



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**ODVLHČOVACÍ ZAŘÍZENÍ**

DEHUMIDIFIER

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Adam Koštuřík

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.

**BRNO 2021**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Adam Koštuřík**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení  
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Odvlhčovací zařízení

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kondenzace a namrzání vzdušné vlhkosti vede ke zvyšování provozních nákladů chladících zařízení. Rychlost torby námrazy lze kromě velikosti teplotního spádu na výparníku ovlivnit také změnou vzdušné vlhkosti. Snížení vzdušné vlhkosti v chlazených prostorech (chladírnách, mrazírnách) tak přispívá k zefektivnění jejich provozu, což se následně odrazí na nižší produkci skleníkových plynů, spojených s výrobou spotřebované elektrické energie.

### Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je provést rešerši využívaných způsobů odvlhčování vzduchu. Na základě provedené rešerše zvolit vhodnou technologii pro odvlhčování vzduchu za nízkých teplot.

### Seznam doporučené literatury:

ÇENGEL, Yunus A., Michael A. BOLES a Mehmet KANOGLU. Thermodynamics: an engineering approach. Ninth edition. New York, NY: McGraw-Hill Education, [2019]. ISBN 978-125-9822-674.

ŠAFARÍK, Pavel a Magda VESTFÁLOVÁ. Termodynamika vlhkého vzduchu. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-06020-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce má seznámit čtenáře s teorií vlhkého vzduchu a jeho odvlhčováním při nízkých teplotách. Jsou zde uvedeny základní způsoby jak vzduch odvlhčovat a následně je vybráno zařízení, které je vhodné pro nízkoteplotní podmínky. Jsou zde také popsány problémy týkající se vlhkosti v chlazených prostorech.

## KLÍČOVÁ SLOVA

vlhký vzduch, odvlhčování, větrání, kondenzace, adsorpce, namrzání výparníku

## ABSTRACT

This bachelor thesis shall inform readers with the theory of humid air and its dehumidification at low temperatures. Here are the basic ways to dehumidify the air and then is selected a device that is suitable for low temperature conditions. Humidity problems in refrigerated areas are also described here.

## KEYWORDS

humid air, dehumidification, ventilation, condensation, adsorption, evaporator freezing

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOŠTUŘÍK, A. *Odvhlčovací zařízení*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Jiří Hejčík.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jiřího Hejčíka Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 20. května 2021

.....

Adam Košťuřík

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Hejčíkovi Ph.D. za cenné rady, připomínky a přínosné konzultace v průběhu přípravy celé bakalářské práce.



# OBSAH

<b>Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Vlhký vzduch.....</b>	<b>11</b>
1.1 Základní pojmy a veličiny .....	12
1.2 Diagramy .....	13
<b>2 Způsoby odvlhčování vzduchu .....</b>	<b>15</b>
2.1 Větrání .....	15
2.2 Kondenzace.....	15
2.2.1 Vodní chladiče .....	17
2.2.2 Užití vodního chladiče pro odvlhčování.....	18
2.2.3 Chladivové – přímé výparníky .....	20
2.2.4 Užití přímého výparníku pro odvlhčování .....	21
2.2.5 Příklad chladicího zařízení s kondenzací vodní páry .....	22
2.3 Adsorpce .....	24
2.3.1 Princip činnosti adsorpčního odvlhčovače .....	26
2.3.2 Názvosloví .....	26
2.3.3 Rozdělení adsorpce.....	28
2.3.4 Materiály využívané pro sušení vzduchu .....	30
2.3.5 Užití adsorpčního rotoru pro odvlhčování.....	31
<b>3 Odvlhčování v chladírnách a mrazírnách .....</b>	<b>32</b>
3.1 Regulovaný teplotní režim .....	32
3.2 Problémy vlhkého vzduchu .....	33
3.2.1 Chladírny .....	34
3.2.2 Mrazírny .....	35
3.2.3 Namrzání výparníku .....	36
3.3 Výběr vhodného zařízení pro odvlhčování .....	38
3.3.1 Zdroj tepla regeneračního vzduchu .....	42
3.3.2 Náklady na odmrazování a čištění.....	43
<b>Závěr .....</b>	<b>45</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů.....</b>	<b>49</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>52</b>

## ÚVOD

Vlhký vzduch může být překážkou, pokud jde například o skladování potravin v chladírnách nebo mrazírnách. Vodní páry mohou kondenzovat či namrznat a následkem jsou nejen pracovní úrazy, které vznikají na kluzkých podlahách, nebo vyšší náklady na čištění, ale také dochází ke snižování chladicího výkonu na výparnicích, což způsobuje větší spotřebu elektrické energie spojenou s vyšší produkcí skleníkových plynů.

Účinnou technologií pro odstranění vzdušné vlhkosti jsou odvlhčovací jednotky, které se efektivně zbavují přebytečné vlhkosti v chlazených prostorech a vytváří tak ideální podmínky pro skladování.

Cílem této práce je popsat způsoby odvlhčování vzduchu a vybrat vhodnou technologii pro odvlhčování při nízkých teplotách.



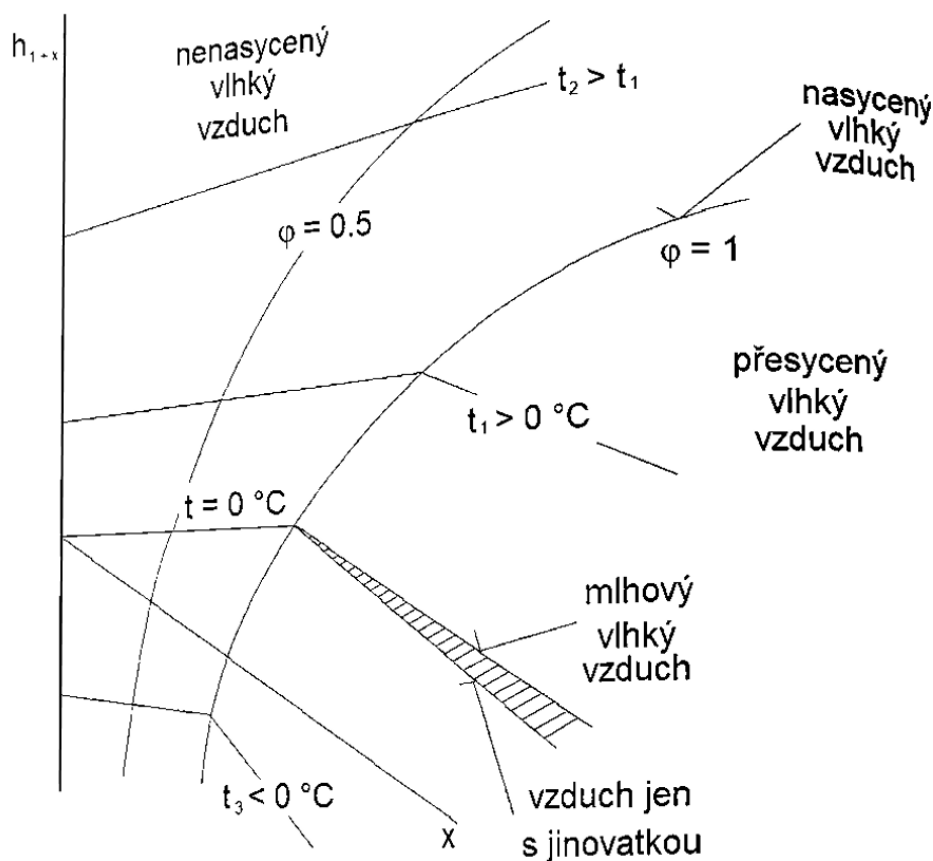
*Obrázek 1 Prostředí mrazírny s namrzáním vodních par [43]*

# 1 VLHKÝ VZDUCH

Vlhký vzduch je směs suchého vzduchu a jistého množství vody ve formě vodních par či mlhy. [13]

Dělí se na:

- Nenasycený vlhký vzduch obsahuje vodu ve formě přehřáté páry (obrázek 2,  $\phi < 1$ ). [13]
- Nasycený vlhký vzduch obsahuje vodu ve formě syté páry a je v něm obsaženo maximální možné množství vlhkosti ve formě páry (obrázek 2,  $\phi = 1$ ). [13]
- Přesycený vlhký vzduch či mlhový vzduch je vzduch s větším množstvím vlhkosti, než odpovídá nasycenému vzduchu. Nadbytečná vlhkost se vysráží ve formě mlhy. Při teplotě  $t \geq 0^\circ\text{C}$  je vzduch přesycený mlhou ve formě kapiček a při  $t \leq 0^\circ\text{C}$  je vzduch přesycený ledovou mlhou ve formě ledových krystalků či jinovatky. Při  $t = 0^\circ\text{C}$  může mlhový vzduch obsahovat mlhu ve formě kapiček i ledovou mlhu. [13]



Obrázek 2 Schéma Mollierova  $h-x$  diagramu vlhkého vzduchu [8]

Složky vlhkého vzduchu se rozlišují indexy: [13]

$v$  – suchý vzduch

$p$  – přehřátá vodní pára

$k$  – voda v kap. skupenství

$p''$  – sytá vodní pára

$t$  – voda v tuhém skupenství

bez indexu – vlhký vzduch

## 1.1 ZÁKLADNÍ POJMY A VELIČINY

*Hmotnost vlhkého vzduchu* je rovna součtu hmotností jednotlivých složek: [13]

$$m = m_v + m_p + m_k + m_t \text{ [kg]} \quad (1.1)$$

*Objem vlhkého vzduchu* je roven objemu suchého vzduchu i vodní páry (objem vodních kapiček i ledových krystalků je zanedbatelný): [13]

$$V = V_v = V_p \text{ [m}^3\text{]} \quad (1.2)$$

*Tlak vlhkého vzduchu* je dán součtem parciálního tlaku suchého vzduchu a vodní páry (Daltonův zákon): [13]

$$p = p_v + p_p \text{ [Pa]} \quad (1.3)$$

$$\text{Stavová rovnice suchého vzduchu: [13]} \quad p_v V = m_v r_v T \quad (1.4)$$

$$\text{Stavová rovnice vodní páry: [13]} \quad p_p V = m_p r_p T, \quad (1.5)$$

kde  $r_v = 287 \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$  je měrná plynová konstanta vzduchu a  $r_p = 462 \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$  je měrná plynová konstanta vodní páry. [13]

*Absolutní vlhkost* je vyjádřena jako součet hmotností vodní páry, kapalné vody a ledu, vydělený objemem vlhkého vzduchu: [13]

$$\Phi = \frac{m_p + m_k + m_t}{V} \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]} \quad (1.6)$$

*Relativní vlhkost* udává, do jaké míry je vzduch nasycen: [13]

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_p''} = \frac{p_p}{p_p''} [-] \quad (1.7)$$

V případě suchého vzduchu je relativní vlhkost  $\varphi = 0$  a pro nasycený vzduch je  $\varphi = 1$ . [13]

*Měrná vlhkost* je nejběžnější veličinou ve vzduchotechnických výpočtech. Udává hmotnost vodní páry (případně i vody v kapalně a tuhé fázi) v 1 kg suchého vzduchu: [13]

$$x = \frac{m_p + m_k + m_t}{m_v} \text{ [kg/kg}_{s.v.}\text{]} \quad (1.8)$$

*Hustota vlhkého vzduchu* se určí vztahem: [14]

$$\rho = \rho_v + \rho_p \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]} \quad (1.9)$$

Po dosazení ze stavových rovnic (1.4) a (1.5) a následné úpravě je hustota vyjádřena jako: [13]

$$\rho = \frac{1}{287 \cdot T} (p - 0,378 \cdot p_p) \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]} \quad (1.10)$$

*Teplota rosného bodu*  $t_r$  [°C] je teplota, při níž je vzduch, při jeho izobarickém ochlazování, právě nasycen vodními parami. Přibližně je to teplota, při níž se odmaštěný rovinný povrch začíná orosovat. Kondenzace na tuhém povrchu je však jev velmi komplikovaný a závisí na fyzikálních vlastnostech jeho mikrostruktury. Rovněž tak stanovení počátku orosování je obtížné. [7]

$$p_p(t) = p_p(t_r) \quad (1.11)$$

Při výpočtech s vlhkým vzduchem je výhodné sledovat 1 kg suchého vzduchu, který obsahuje proměnlivé množství  $x$  vodních par. V procesech úprav vzduchu se totiž hmotnost suchého vzduchu nemění. S tím souvisí i veličina nazývaná *entalpie*  $h$  [kJ/kg<sub>s.v.</sub>]. [7] Jedná se o fyzikální veličinu, která vyjadřuje tepelnou energii uloženou v jednotkovém množství látky. [18]

*Entalpii vlhkého vzduchu* pro nenasyčený a nasycený vlhký vzduch je možno s dostatečnou přesností vyjádřit vztahem: [13]

$$h = h_v + x_p \cdot h_p = \overline{c_{pv}} \cdot t + x_p(\overline{c_{pp}} \cdot t + l_{(23)tr}) \text{ [kJ/kg}_{s.v.}\text{]}, \quad (1.12)$$

kde  $\overline{c_{pv}} = 1,01$  [kJ/kg·K] a  $\overline{c_{pp}} = 1,84$  [kJ/kg·K] jsou střední měrné tepelné kapacity při konstantním tlaku suchého vzduchu a vodní páry,  $t$  [°C] je teplota a  $l_{(23)tr} = 2500$  [kJ/kg] je měrné výparné teplo vody při teplotě trojného bodu. [13]

## 1.2 DIAGRAMY

Tepelné a vlhkostní změny stavu vzduchu se znázorňují v diagramu  $h$ - $x$  podle Molliera (obrázek 3). V současné době se v anglosaské literatuře užívá také psychrometrický diagram (obrázek 4), který má kosoúhlé souřadnice  $h$ - $x$ , jeho souřadné osy jsou však oproti Mollierovu diagramu otočené. [5]

Mollierův diagram obsahuje v kosoúhlé souřadné soustavě  $h$ - $x$  přímky konstantních teplot  $t = konst.$  (izotermie) a křivky konstantních relativních vlhkostí  $\varphi = konst.$ , případně i přímky konstantní hustoty (vlhkého) vzduchu  $\rho = konst.$  Diagram se konstruuje pro konstantní celkový tlak vzduchu  $p$  (barometrický tlak). V ČR se obvykle používají diagramy pro  $p = 98$  kPa (průměrný tlak vzduchu v městech ČR), ale také pro  $p = 100$  kPa. [5]

Kromě čar  $h$ ,  $x$ ,  $t$ ,  $\varphi$  se na spodní okraj diagramu vynáší parciální tlak vodních par  $p_v$ ; dále jsou po okraji diagramu vyneseny další dvě veličiny - směr  $\delta$  a faktor citelného tepla  $\vartheta$  (obrázek 3). [5]

*Směr  $\delta$*  (směr změny, směrové měřítko) je směrnice přímky v souřadnicích  $h$ ,  $x$ . Umožňuje vyjádřit změnu stavu vlhkého vzduchu z počátečního stavu 1 na konečný stav 2. [5]

$$\delta = \frac{dh}{dx} = \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1} \text{ [J/kg}_{s.v.}\text{]} \quad (1.13)$$

*Faktor citelného tepla  $\vartheta$*  je měřítko, které je vyneseno v horní části diagramu a vyjadřuje poměr změny citelného tepelného toku  $\dot{Q}_c$  k celkovému sdělenému tepelnému toku  $\dot{Q}$  (citelnému  $\dot{Q}_c$  i vázanému  $\dot{Q}_v$ ): [5]

$$\vartheta = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_c + \dot{Q}_v} = \frac{\dot{M} \cdot c_v \cdot \Delta t}{\dot{M} \cdot \Delta h} = \frac{c_v \cdot \Delta t}{\Delta h} [-] \quad (1.14)$$

Při úpravách vzduchu dochází ke změnám, kdy se mění současně *tok citelného tepla*, který vyjadřuje změnu teploty vzduchu, [5]

$$\dot{Q}_c = \dot{M} \cdot c_v \cdot \Delta t [W] \quad (1.15)$$

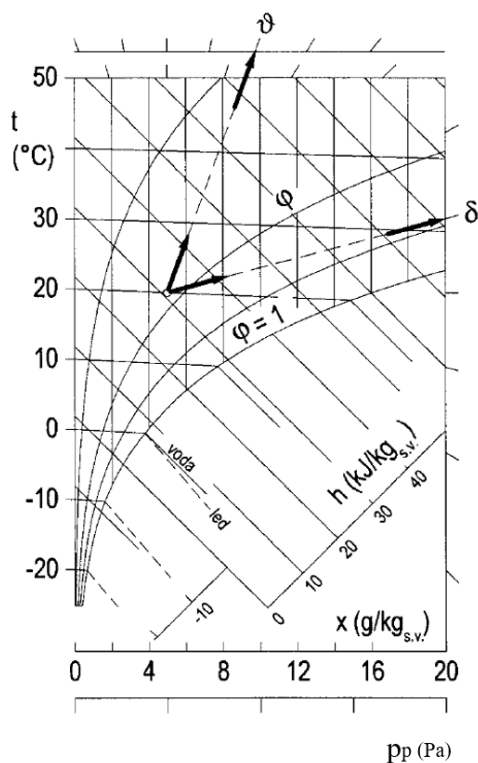
i celkový tok tepla, který zahrnuje i teplo vázané ve vodní páře, jejíž množství se při dané úpravě mění  $\rightarrow$  přírůstek, úbytek  $\Delta x$ : [5]

$$\dot{Q} = \dot{M} \cdot \Delta h [W] \quad (1.16)$$

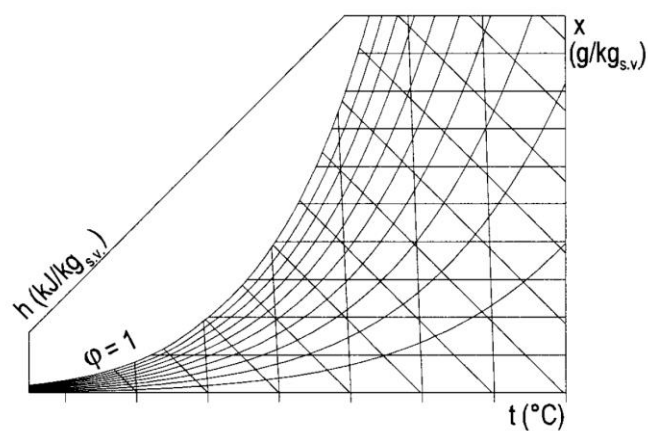
Parciální tlak vodních par ve vzduchu  $p_p$  je tlak, který je vázán s absolutní vlhkostí  $\rho_p$  stavovou rovnicí (1.5): [13]

$$p_p = \rho_p r_p T [Pa] \quad (1.17)$$

Teplota mokrého teploměru  $t_m$  je rovnovážná teplota, při níž teplo, potřebné k odpařování z mokrého povrchu je dodáváno z okolí. Jinak řečeno – teplota, které dosáhne v rovnovážném stavu teploměr s čidlem obaleným mokrou punčoškou (dostatečně chráněném proti přestupu tepla sáláním) při nuceném proudění vzduchu. Teplota  $t_m$  se blíží fyzikálně definované teplotě mezního adiabatického ochlazení  $t_{ad}$ , což je teplota vodní lázně, při níž všechno teplo při izobarickém odpařování vody z hladiny je dodáno konvekcí ze vzduchu. [5]



Obrázek 3 Schéma Mollierova  $h$ - $x$  diagramu [5]



Obrázek 4 Psychrometrický diagram [5]

## 2 ZPŮSOBY ODVLHČOVÁNÍ VZDUCHU

Odvlhčování není v našich klimatických podmínkách nezbytnou součástí komfortních větracích či klimatizačních zařízení. Přesto se odvlhčovací jednotky využívají například ve stavebnictví, farmaceutickém či potravinářském průmyslu, výrobních halách nebo skladech. K odvlhčování se používá tři základních principů: [6]

- **Odvlhčování větráním.** Pro odvod vlhkosti se používá intenzivní větrání venkovním ohřátým vzduchem. Ohříváč s ventilátorem nemá žádný speciální funkční prvek určený k odvlhčování, je pouze nutné dostatečně dimenzovat průtok vzduchu. [6]
- **Kondenzační odvlhčování.** Vzduch je ochlazován výměníkem, kde dochází ke kondenzaci vodní páry. [6]
- **Adsorpční odvlhčování.** Vlhkost ze vzduchu se váže na povrchu pevné látky účinkem mezimolekulových přitažlivých sil. [6]

### 2.1 VĚTRÁNÍ

Nejdéle známý princip snižování vlhkosti vzduchu je založený na základní fyzikální skutečnosti, že teplejší vzduch dokáže pojmout více vlhkosti než vzduch studený. Proto se vysoušení vykonává zvýšením teploty v místnosti a intenzivním větráním. Nevýhodou u konvenčního odvlhčování je jeho energetická náročnost, kdy vložená energie do ohřevu vzduchu je nezužitkována a vypuštěna do venkovního ovzduší. [1]

Potřebné množství venkovního vzduchu přiváděného do větraného prostoru, které má zajistit požadovanou vlhkost v místnosti je dáno vztahem: [12]

$$\dot{V}_p = \frac{\dot{M}_w}{\rho_v(x_o - x_p)} [m^3 \cdot s^{-1}], \quad (2.1)$$

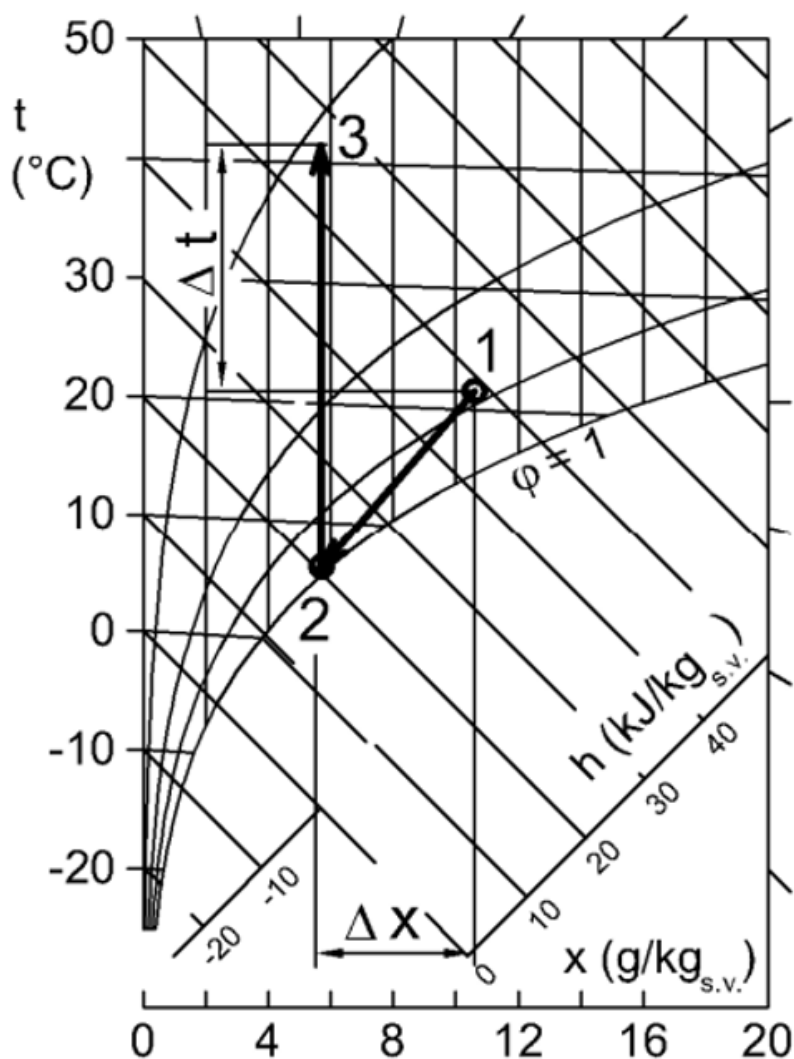
kde  $\dot{M}_w [kg \cdot s^{-1}]$  je hmotnostní tok vlhkosti vyvíjené v místnosti,  $\rho_v [kg \cdot m^{-3}]$  hustota suchého vzduchu a  $x_o, x_p [kg/kg_{s.v.}]$  měrná vlhkost vzduchu odváděného a přiváděného. [12]

### 2.2 KONDENZACE

Ke kondenzaci vodních par dochází při chlazení vzduchu výměníkem, jehož povrchová teplota je nižší než teplota rosného bodu chlazeného vzduchu. Takový výměník musí mít ošetřeno zachytávání vodních kapek a odvod kondenzátu. [6]

Pokud se vyžaduje pouze snížení měrné vlhkosti, je potřeba vzduch opět ohřát na původní teplotu. Pro kondenzační odvlhčování se tedy využívá chladiče i ohříváče. V odvlhčovacích jednotkách se často využívá výparník a kondenzátor spolu s kompresorovým zařízením. Výhodou tohoto uspořádání je přečerpávání tepla mezi chladičem a ohříváčem, zařízení spotřebovává pouze elektrickou energii na pohon kompresoru a ventilátorů. V případě, že se veškeré kondenzační teplo předává do odvlhčovaného vzduchu, dochází k jeho ohřevu na teplotu výrazně vyšší, nežli je teplota vzduchu před chlazením. [6]

Kondenzační odvlhčování se používá především tam, kde je vysoká měrná vlhkost vzduchu a teplota nad bodem mrazu (pro teploty přibližně pod 16 °C dochází ke ztrátě účinnosti kondenzačního odvlhčovače, přesto někteří výrobci uvádějí provozní teploty až do 3 ÷ 5 °C).



Obrázek 5 Kondenzační odvlhčování v  $h$ - $x$  diagramu s parním oběhem kompresorového zařízení [6]

Pokud je střední povrchová teplota chladiče nižší než teplota rosného bodu upravovaného vzduchu, dochází při chlazení ke kondenzaci (tzv. **mokrý chlazení**). Teplota vzduchu se snižuje, podobně se snižuje i měrná vlhkost, klesá entalpie a naopak roste relativní vlhkost. Množství zkondenzované vody  $\dot{M}_k$  se spočítá z rozdílu měrných vlhkostí  $x$ . [6]

$$\dot{M}_k = \dot{M} \cdot (x_1 - x_2) \text{ [kg/s]} \quad (2.2)$$

kde  $\dot{M}$  je hmotnostní průtok vzduchu výměníkem. [6]

Při výpočtech chladiče s kondenzací vodních par se většinou vychází z přímkového průběhu změny stavu (obrázek 5, spojnice 1-2), kdy je směr změny dán povrchovou teplotou chladiče. [6]

Chladiče rozdělujeme na **vodní** a **chladičové** (přímé výparníky).

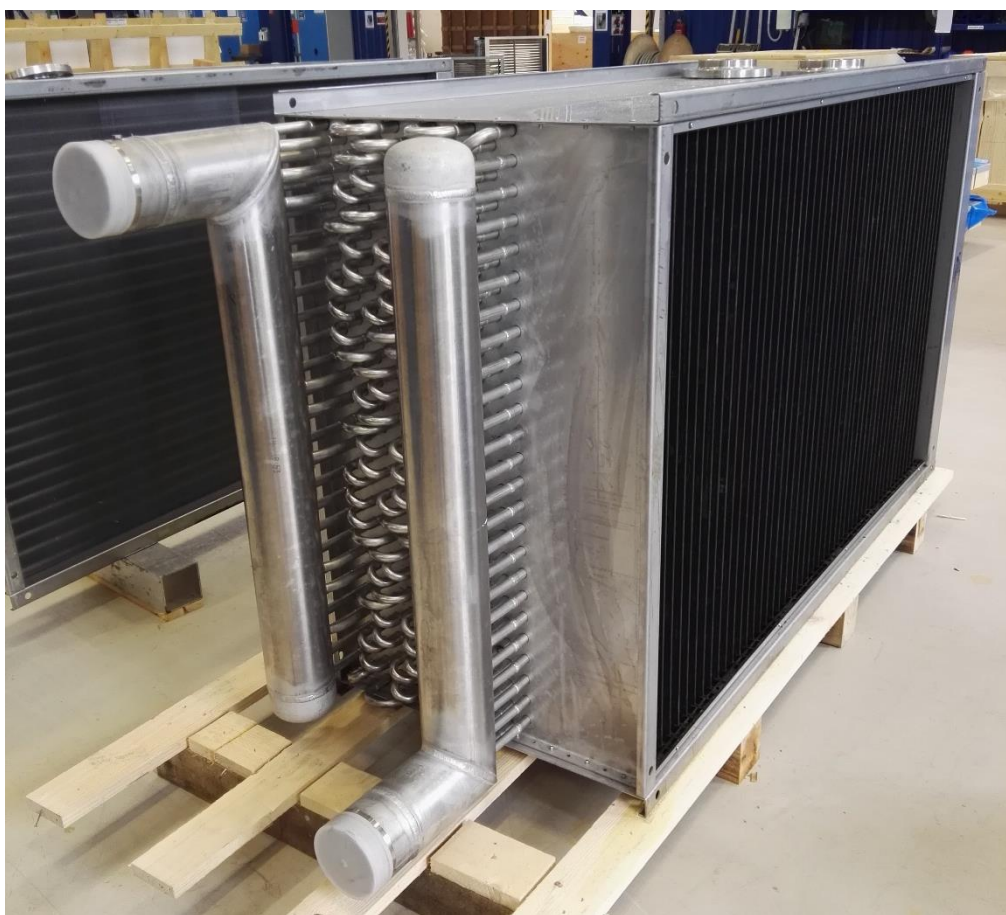


### 2.2.1 VODNÍ CHLADIČE

Jedná se o rekuperační výměníky vzduch – voda. Teplonosnou látkou je voda. Běžně se vstupní teplota chladicí vody pohybuje kolem 3 až 8 °C a výstupní teplota je o 5 až 8 K vyšší. Vodní chladiče se obvykle konstruují jako víceřadé (obvykle 2 až 5) s lamelami na straně vzduchu. Časté je provedení z měděných trubek s hliníkovými lamelami. V příloze č. 1 je uveden technický list k výměníku na obrázku 6. [6]

Jsou dvě možnosti, jak regulovat výkon vodního chladiče. U menších systémů rozvodu chladné vody je regulace zdroje chladu problematická. Zdroj chladu musí mít *schopnost regulace chladicího výkonu* nebo musí být mezi zdrojem a chladičem připojen *akumulační zásobník*, který umožní plynulou regulaci chladicího výkonu i v případě, kdy zdroj chladu pracuje jen s regulací vypnuto – zapnuto. [6]

Namrzání chladiče se řeší protimrazovou ochranou. Například v klimatizačních jednotkách se chladiče umísťují až za ohříváče, takže v zimním provozu jsou chráněny protimrazovou ochranou ohříváče. V případě, že je v jednotce chladič před ohříváčem nebo v jednotce protimrazová ochrana chybí, musí být použita nemrznoucí směs (např. voda s glycolem). V případě, že je chladicí voda vedena ve venkovním prostředí, je potřeba tyto rozvody izolovat. [6]



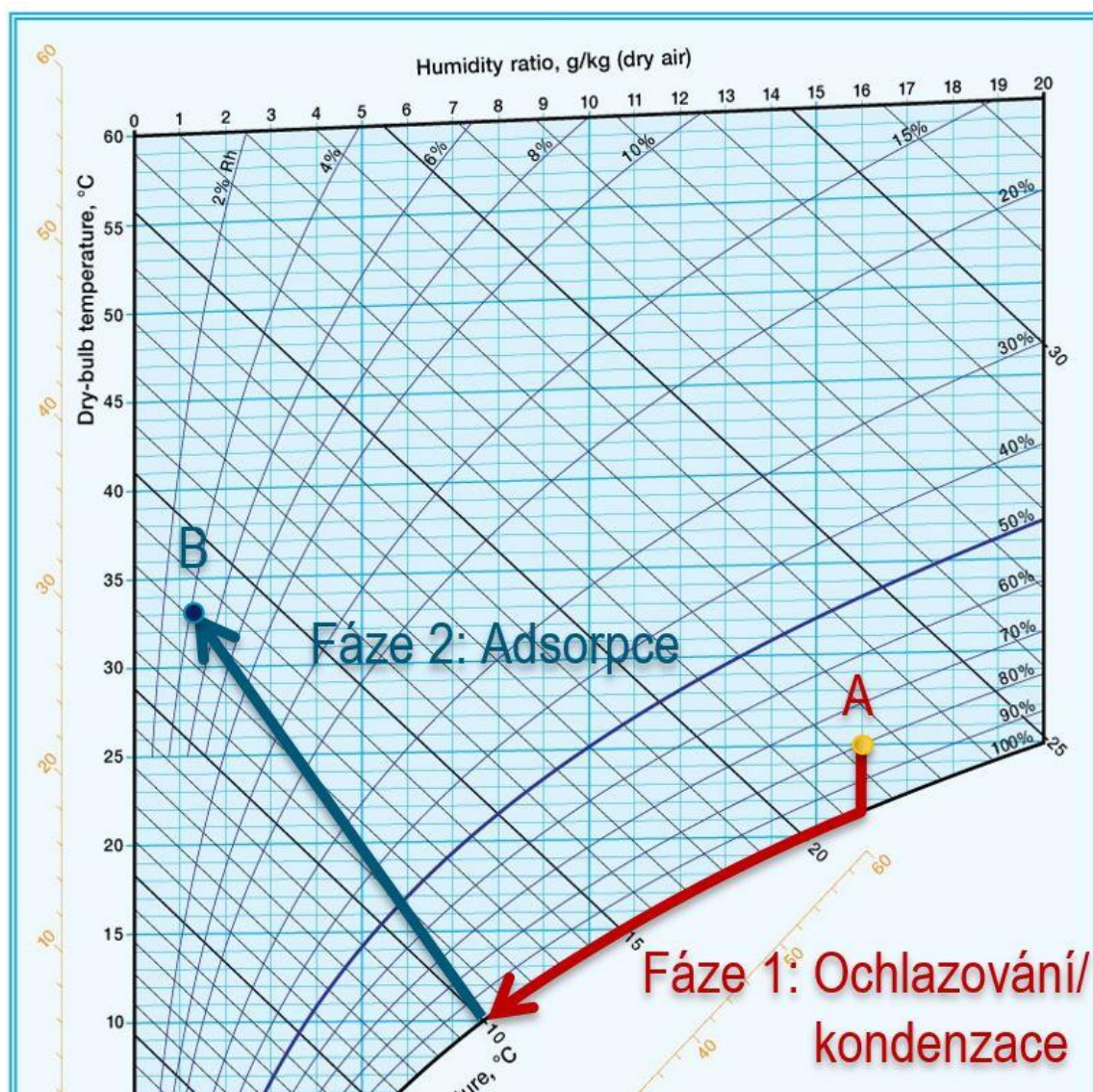
Obrázek 6 Vodní chladič s lapačem kapek

### 2.2.2 UŽITÍ VODNÍHO CHLADIČE PRO ODVLHČOVÁNÍ

Vodní chladiče jsou používány zejména pro průmyslové vzduchotechnické jednotky, kde dochází k přenosu velkého množství vzduchu. Své využití našly například v jednotkách, kde se způsob odvlhčování kombinuje. Názorným příkladem je jednotka od firmy Munters na obrázku 9.

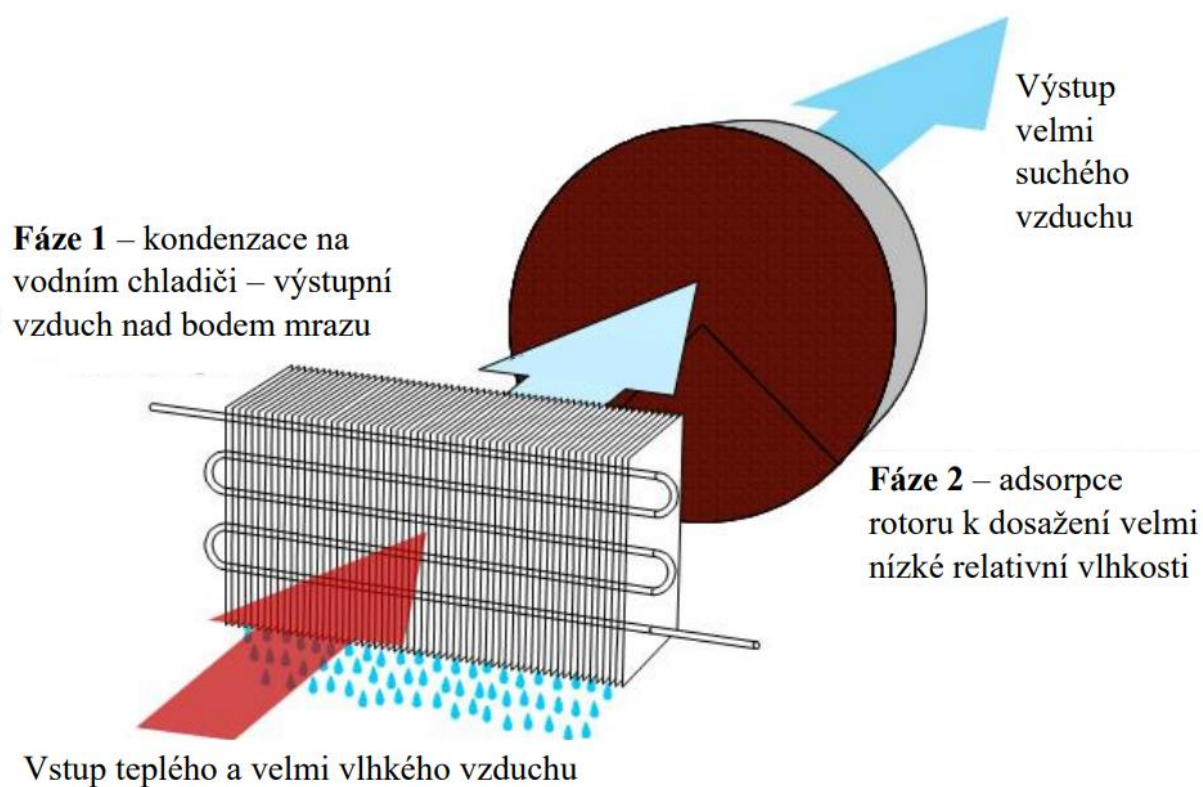
Na obrázku 7 je uveden příklad v h-x diagramu, kdy v bodě A je teplota vzduchu 25 °C, relativní vlhkost 80% a měrná vlhkost vzduchu 16 g/kg. Po **fázi 1**, kde část vzdušné vlhkosti zkondenzuje, se teplota vzduchu změnila na 10 °C a měrná vlhkost klesla na 7,7 g/kg. Následně po **fázi 2**, kde došlo k adsorpci vzdušné vlhkosti na rotoru (bod B), měrná vlhkost klesla až na 1,3 g/kg a teplota vzduchu vzrostla na 33 °C. Pokud je potřeba výstupní vzduch ještě dochladiť, lze použít další výměník, který vzduch upraví na požadovanou teplotu.

Princip činnosti kombinovaného odvlhčování je naznačen v obrázku 8.



Obrázek 7 Znáznornění kombinovaného způsobu odvlhčování v h-x diagramu [16]





Obrázek 8 Kombinovaný způsob odvlhčování [16]



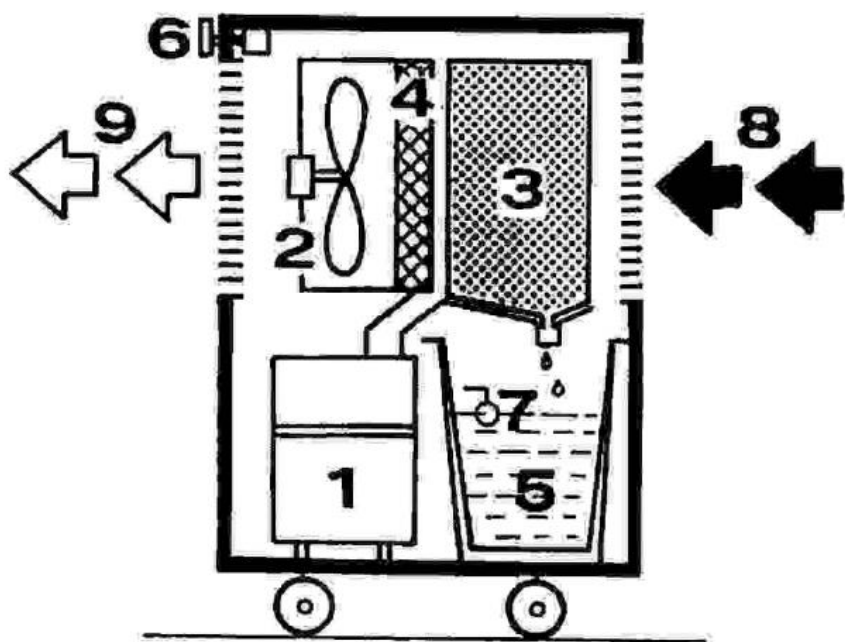
Obrázek 9 Pohled na vodní chladič v jednotce PureSystem™ od firmy Munters

### 2.2.3 CHLADIVOVÉ – PŘÍMÉ VÝPARNÍKY

Tyto výměníky nacházejí poměrně široké uplatnění například v cirkulačních jednotkách chladivových zařízení nebo v centrálních klimatizačních jednotkách. Rekuperační výměník chladivo – vzduch je součástí oběhu chladiva. Škrticí ventil vstřikuje kapalně chladivo do výparníku, které se odpařuje a přes stěny výměníku odebírá teplo proudy vzduchu. Mezi hlavní výhody přímých výparníků patří vyšší chladicí faktor zařízení, schopnost dosahovat nižších teplot vzduchu a není potřeba vodní okruh. Nevýhodou je riziko namrzání a obtížnější regulace, případně i vyšší nároky na kvalitu montáže chladivového okruhu. Kvůli vznikající námraze mívají přímé výparníky větší rozteč lamel než vodní chladiče. Přestup tepla je na straně chladiva horší a námraza, která na výparnících často vzniká, zmenšuje průřez. Odmrazování přímých výparníků snižuje jejich výkon a zhoršuje chladicí faktor systému. [6]

Možnost regulace výkonu přímých výparníků je obtížnější. Často se řeší jako vypnuto/zapnuto. Existují také elektronické škrticí ventily, které mají ovšem omezené možnosti regulace. Někteří výrobci regulují výkon přímých výparníků mikropsínáním. Pro systémy s plynulou regulací výkonu výparníku je nutný proměnný průtok chladiva okruhem a regulace otáček kompresoru. [6]

Schéma odvlhčovače s přímým výparníkem je znázorněno na obrázku 10.

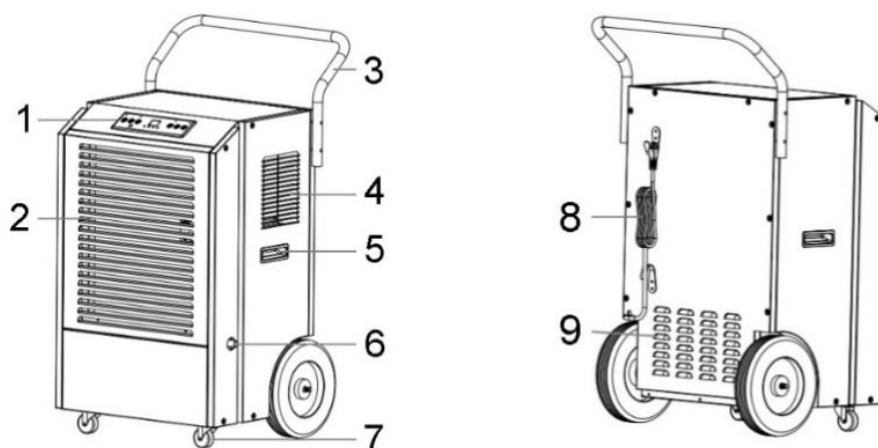


- 1 - kompresor, 2 - ventilátor, 3 - výparník,  
4 - kondenzátor, 5 - nádoba na vodu, 6 - hygrosťat,  
7 - plovák, 8 - vlhký vzduch, 9 - suchý vzduch

Obrázek 10 Schéma kondenzačního odvlhčovače s přímým výparníkem [41]

### 2.2.4 UŽITÍ PŘÍMÉHO VÝPARNÍKU PRO ODVLHČOVÁNÍ

Mezi hlavní zástupce kondenzačních odvlhčovačů s chladivovými výměníky patří mobilní odvlhčovače, které mají kompaktní rozměry a jsou hojně využívány ve stavebnictví. Jeden takový je uveden na obrázku 11. Nevýhodou je rozsah provozních teplot kolem  $5 \div 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V případě, kdy dojde v místnosti k poklesu teploty (např. na  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), jednotka přepne do režimu automatického odmrazování.



1. Ovládací panel
2. Vstup vzduchu
3. Rukojeť
4. Výstup vzduchu
5. Madlo

6. Výstup pro připojení odtokové hadice
7. Pojezdová kolečka
8. Napájecí kabel
9. Mřížka

Obrázek 11 Odvlhčovač Rohnson R-9390 s přímým výparníkem [38]

Další technické parametry jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 Technické parametry odvlhčovače Rohnson R-9390 [38]

Výkon odvlhčování	90 litrů/den
Provozní teplota	$5 \div 35\text{ }^{\circ}\text{C}$
Objem průtoku vzduchu	$850\text{ m}^3/\text{h}$
Příkon	920 W
Hlučnost	58 dB
Chladivo	R290
Jmenovitý rozsah napětí	$220 \div 240\text{ V}$

### 2.2.5 PŘÍKLAD CHLADICÍHO ZAŘÍZENÍ S KONDENZACÍ VODNÍ PÁRY

**Úvod:** Vzduch vstupuje do chladicího zařízení s teplotou 30 °C a relativní vlhkostí 80 % o celkovém objemu  $\dot{V}_1 = 10 \text{ m}^3/\text{min}$ . Vystupuje jako nasycený vzduch o teplotě 14 °C. Část vlhkosti obsažené ve vzduchu během procesu zkondenzuje při teplotě 14 °C. Viz obrázek 12. Úkolem je zjistit potřebný chladicí výkon a množství zkondenzované vlhkosti. [3]

**Předpoklady:** 1. Jedná se o proces ustáleného toku, tedy hmotnostní průtok suchého vzduchu zůstává konstantní během celého procesu. 2. Suchý vzduch a vodní pára jsou ideální plyny. 3. Změny kinetické a potenciální energie jsou zanedbatelné. [3]

**Vlastnosti:** Entalpie vody ve stavu syté kapaliny při 14 °C je 58,8 kJ/kg. Rovněž jsou zcela specifikovány vstupní a výstupní stavy vzduchu. Celkový tlak je 1 atm (101 325 Pa). Z h-x diagramu tedy můžeme určit vlastnosti vzduchu v obou stavech (obrázek 13): [3]

$$h_1 = 85,4 \text{ kJ/kg}_{\text{s.v.}}$$

$$h_2 = 39,3 \text{ kJ/kg}_{\text{s.v.}}$$

$$x_1 = 0,0216 \text{ kg/kg}_{\text{s.v.}}$$

$$x_2 = 0,0100 \text{ kg/kg}_{\text{s.v.}}$$

$$V_1 = 0,889 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{s.v.}}$$

**Analýza:** Chladicí část považujeme za systém. Schéma procesu systému a h-x diagramu je znázorněno na obrázku 12 a 13. Z diagramu je patrné, že množství vodní páry ve vzduchu klesá během procesu vlivem odvlhčování ( $x_2 < x_1$ ). Použitím rovnic pro hmotnost a energii chladicí a odvlhčovací sekce dostáváme: [3]

$$\text{Suchý vzduch: } \dot{M}_1 = \dot{M}_2 = \dot{M} \quad (2.2)$$

$$\text{Kondenzát: } \dot{M}_1 \cdot x_1 = \dot{M}_2 \cdot x_2 + \dot{M}_k \quad \rightarrow \quad \dot{M}_k = \dot{M} \cdot (x_1 - x_2) \quad (2.3)$$

$$\text{En. rovnováha: } \sum_{in} \dot{M} \cdot h = \dot{Q}_{out} + \sum_{out} \dot{M} \cdot h \quad \rightarrow \quad \dot{Q}_{out} = \dot{M} \cdot (h_1 - h_2) - \dot{M}_k \cdot h_k \quad (2.4)$$

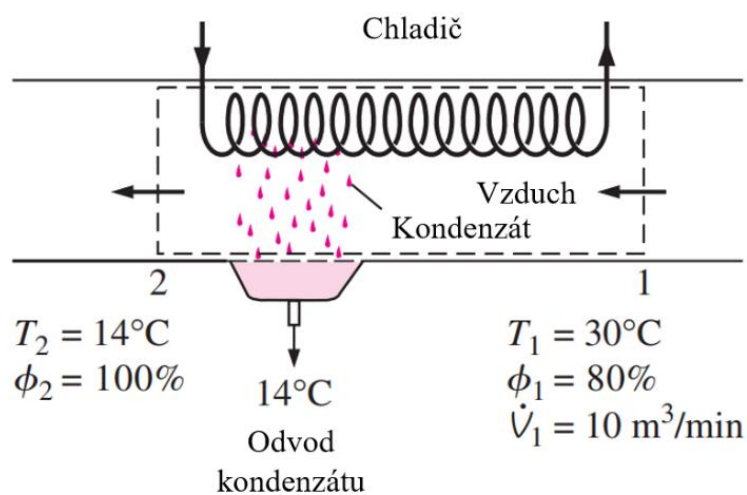
pak,

$$\dot{M} = \frac{\dot{V}_1}{V_1} = \frac{10}{0,889} = 11,25 \text{ [kg} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.5)$$

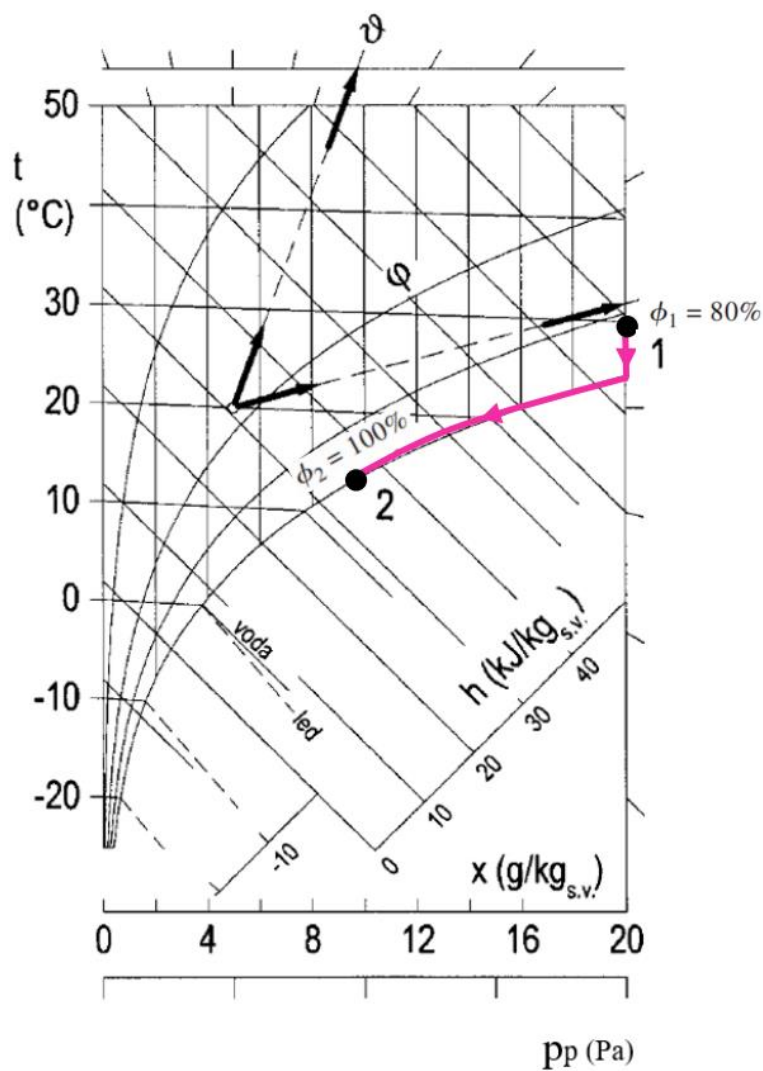
$$\dot{M}_k = 11,25 \cdot (0,0216 - 0,0100) = 0,131 \text{ [kg} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.6)$$

$$\dot{Q}_{out} = [11,25 \cdot (85,4 - 39,3)] - [0,131 \cdot 58,8] = 511 \text{ [kJ} \cdot \text{min}^{-1}] = 8,52 \text{ kW} \quad (2.7)$$

Toto chladicí zařízení odvádí ze vzduchu vlhkost rychlostí 0,131 kg/min, čemuž odpovídá požadovaný chladicí výkon 8,52 kW.



Obrázek 12 Schéma chladicího procesu [3]



Obrázek 13 Mollierův h-x diagram [3, 5]

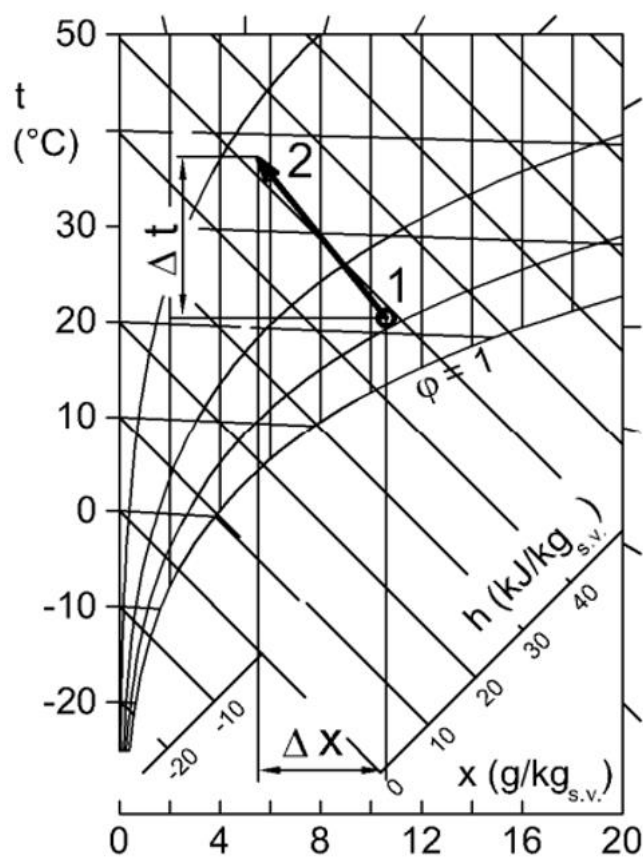
## 2.3 ADSORPCE

Adsorpční odvlhčování je proces, kdy se vzdušná vlhkost váže na povrchu adsorbentu. Průběh je limitován rychlostí adsorpce či adsorpční rovnováhou, která určuje maximální množství látky, které je za daných podmínek možné adsorbovat. Pro zajištění opakovaného procesu je třeba adsorbent regenerovat zvýšením jeho teploty. [6]

Odvlhčovací jednotky většinou používají rotory ve tvaru válce s drobnými kanálky, na jejichž povrchu je nanesen adsorbent. Část rotoru je v proudu odvlhčovaného vzduchu, kde dochází k adsorpci vlhkosti do adsorbentu. V druhé části rotoru probíhá desorpce, tedy regenerování horkým vzduchem. Odvlhčovací zařízení je proto vybaveno nejen rotorem, ale i ohřívacem regeneračního vzduchu, případně chladičem vzduchu za rotorem. Schéma je znázorněno na obrázku 15. [6]

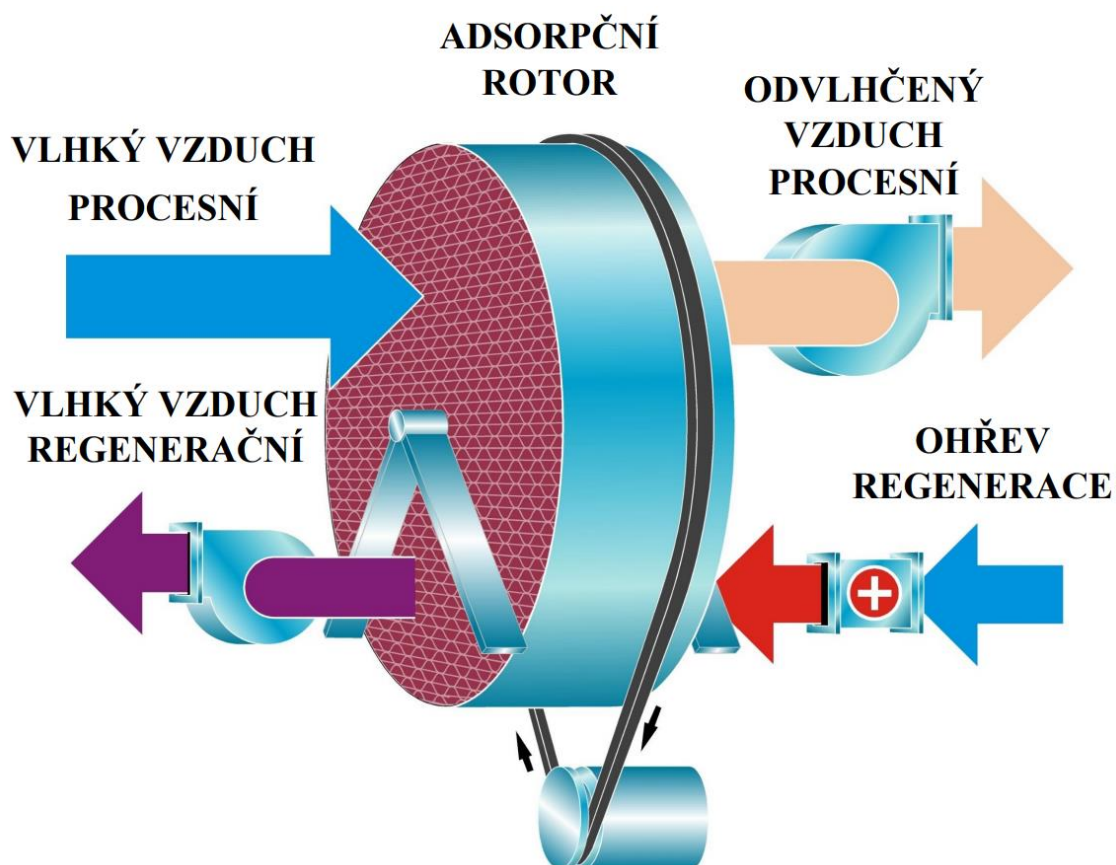
Během adsorpčního procesu dochází nejen k odvlhčování vzduchu, ale také k přenosu tepla z regenerační části a z uvolňovaného kondenzačního tepla. Směr změny v  $h$ - $x$  diagramu závisí na konkrétním provedení zařízení a poměru přenosu tepla a vlhkosti v něm (znázorněno na obrázku 14). [6]

K adsorpci se mohou využívat různé materiály. Rozdělení je uvedeno v kapitole 2.3.4. Adsorpční odvlhčování je využíváno většinou v cirkulačním režimu. Je vhodné pro nízké teploty a pro dosažení nízkých měrných vlhkostí. Mezi nevýhody adsorpčního odvlhčování patří potřeba ohřevu regeneračního vzduchu. [6]



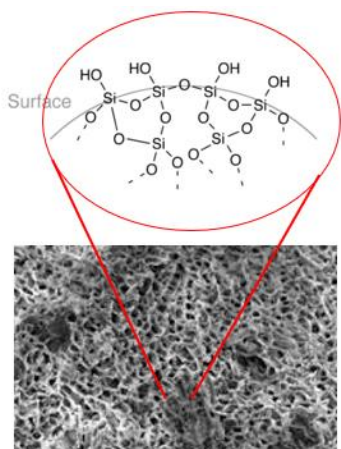
Obrázek 14 Adsorbční odvlhčování v  $h$ - $x$  diagramu [6]





Obrázek 15 Schéma principu činnosti adsorpčního odvlhčovače [27]

V praxi se může adsorpční odvlhčování využívat s technologií chlazení vzduchu DEC (Desiccative and Evaporative Cooling) - odvlhčování a následné adiabatické chlazení s využitím upravených rotačních výměníků pro zpětné získávání tepla. Povrch rotoru je vyroben z tkaniny ze skleněných vláken, na které je nanesena vrstva adsorbentu (např. silikagelu – obrázky 16 a 17). [5]

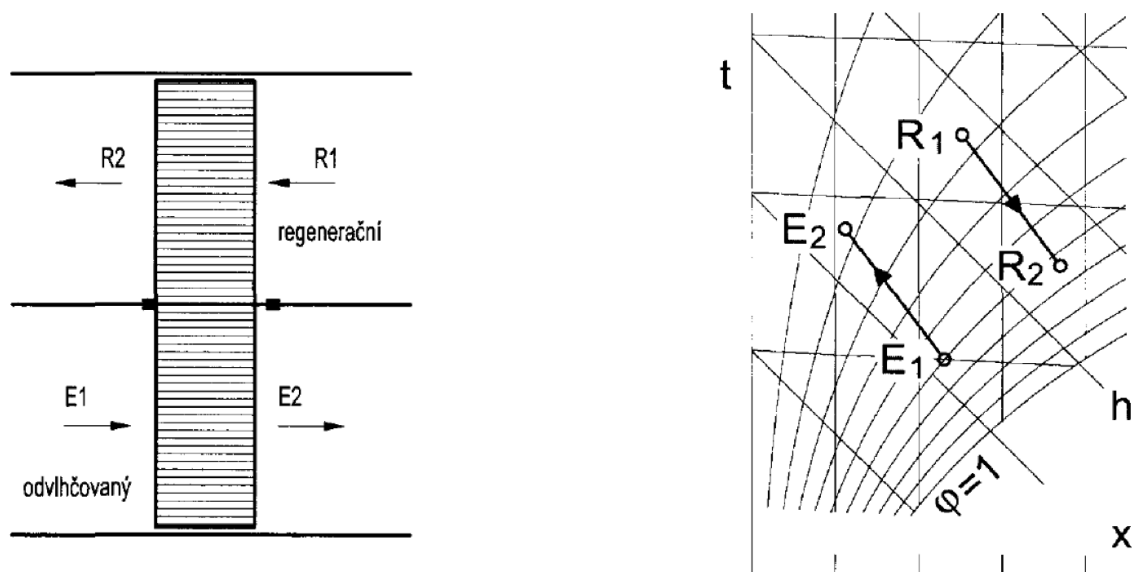


Obrázek 16 Mikroskopický snímek silikagelu [16]



Obrázek 17 Detailní pohled na kanálky rotoru s viditelnými skleněnými vlákny [16]

### 2.3.1 PRINCIP ČINNOSTI ADSORPČNÍHO ODVLHČOVAČE



Obrázek 18 Adsorpční odvlhčování [5]

Vlhký vzduch (**E1**) vstupuje do kanálků rotoru (obrázek 18, vlevo), kde dochází na povrchu adsorbentu k adsorpci. Současně se odvlhčovaný vzduch vlivem uvolňovaného adsorpčního tepla zahřívá (změna **E1** na **E2**; obrázek 18, vpravo). Teoreticky se jedná o izoentaltickou změnu. Odchylku od izoentalpy způsobuje tepelný tok, který do odvlhčovaného vzduchu přestupuje ze zahřátého povrchu rotoru regenerační sekce. Odvlhčený vzduch o stavu **E2** je přiváděn do prostoru, kde je požadována nižší vlhkost. [5]

V regenerační sekci se navázaná vlhkost z rotoru vypařuje do regeneračního vzduchu **R2**. Regenerační vzduch na vstupu **R1** dosahuje teploty až 75 °C. Teplo potřebné k vypaření vlhkosti se odnímá regeneračnímu vzduchu, ten se ochlazuje a navlhčuje. Teoreticky se jedná o izoentaltickou změnu (změna **R1** na **R2**; obrázek 18, vpravo). Odchylku od izoentalpy způsobuje vychlazování regeneračního vzduchu přestupem tepla z vychlazeného rotoru v odvlhčované sekci. [5]

Zvýšená teplota odvlhčeného vzduchu o stavu **E2** se v procesu DEC i v jiných variantách následně chladí. Vzduch regenerační se naopak musí ohřívat na stav **R1**. [5]

Systém DEC umožňuje řešit chlazení a odvlhčování vzduchu bez použití kompresorového chladicího zařízení. Využívá k tomu zpětného získávání citelného tepla v kombinaci s adiabatickým vlhčením [5]

### 2.3.2 NÁZVOSLOVÍ

*Adsorbent* je pevná látka, na které dochází k adsorpci. Povrch adsorbentu mívá až stovky  $\text{m}^2/\text{g}$ . [2]

*Specifický povrch* je veličina, která se používá k popsání velikosti povrchu. Je definována jako poměr povrchu pórů k objemu celé vrstvy: [2]

$$a = \frac{A}{V_c} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}] \quad (2.5)$$

*Vlastní specifický povrch*  $a_v$  je definován jako celkový povrch částic k objemu pevné fáze: [2]

$$a_v = \frac{A}{V_s} \quad [m^2 \cdot m^{-3}] \quad (2.6)$$

*Specifický povrch podle hmotnosti*  $a_m$  je veličina, která se častěji využívá při popisu vlastností adsorbentů: [2]

$$a_m = \frac{A}{m} = \frac{A}{V_s \rho_s} = \frac{a_v}{\rho_s} = \frac{a}{(1 - \varepsilon) \rho_s} \quad [m^2 \cdot kg^{-1}] \quad (2.7)$$

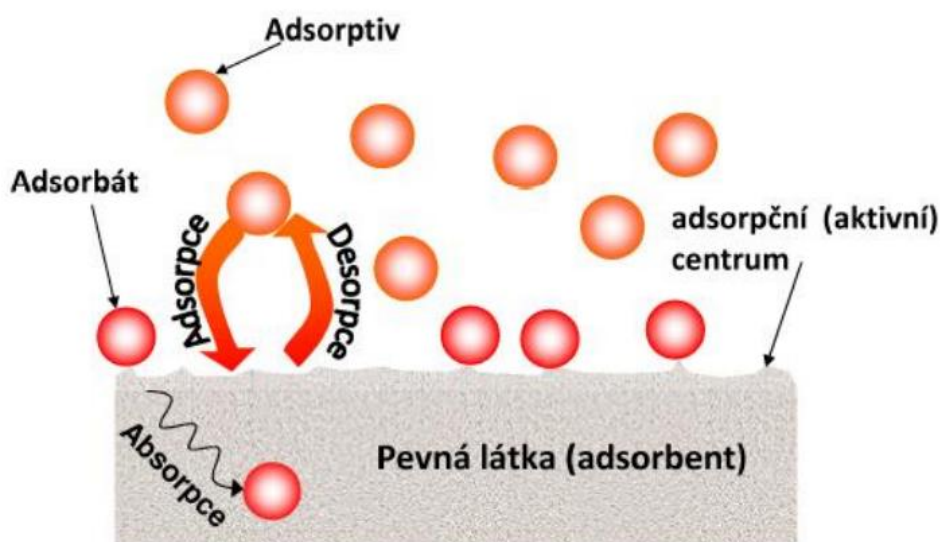
kde  $\rho_s$  [ $kg \cdot m^{-3}$ ] je hustota pevné fáze a  $\varepsilon$  [-] veličina zvaná porozita (poměr objemu pórů k celkovému objemu). [2]

*Adsorptiv* je označení pro složku kapaliny nebo plynu, která potenciálně může podléhat adsorpci, ale ještě není v adsorbovaném stavu. [2]

*Adsorbát* je složka tekutiny, která se adsorbuje na povrch adsorbentu. Přechází tedy do adsorbovaného stavu na povrchu pevné látky (mezifázové ploše). Molekuly tekutiny se na povrch váží fyzikálně (fyzikální adsorpce) nebo chemicky (chemisorpce). Maximální množství, které je možné navázat, je dáno adsorpční rovnováhou. [2]

V některých specifických případech může docházet současně k adsorpci i absorpci (vstřebávání adsorbátu do adsorbentu). V takovém případě se děj označuje jako sorpce a odvozené termíny (sorcent, sorptiv a sorbát) mají stejný význam jako v případě adsorpce. [2]

*Desorpce* má opačný význam jako adsorpce. Dochází k převádění adsorbátu z povrchu adsorbentu zpět do okolí. Na následujícím obrázku 19 jsou znázorněny pojmy spojené s procesy adsorpce. [2]



Obrázek 19 Názvosloví adsorpce [2]

### 2.3.3 ROZDĚLENÍ ADSORPCE

- a) Dělení z hlediska vyskytujících se fází

Tabulka 2 Rozdělení adsorpce dle fází [4]

Adsorbent	Adsorbát	Příklad využití
pevná fáze	kapalina	vlhkost z benzínu, obarvování cukru
pevná fáze	plyn	<b>sušení vzduchu</b> , dělení uhlovodíků
kapalina	kapalina	povrchově aktivní látky, detergenty a tensidy
kapalina	plyn	povrchově aktivní látky, detergenty a tensidy

- b) Dělení z hlediska vazebních sil

Adsorpce se podle přitažlivých sil dělí na fyzisorpci a chemisorpci. Pokud jsou přitažlivé síly, které vážou molekuly k povrchu adsorbentu čistě fyzikální povahy, jedná se o fyzisorpci. Pokud vzniká mezi adsorbátem a adsorbentem chemická vazba, je tento specifický děj označován jako chemisorpce. [9]

#### *Fyzikální adsorpce (fyzisorpce)*

Molekuly plynu nebo kapaliny jsou vázány k povrchu adsorbentu fyzikálními van der Waalsovými silami, které působí mezi všemi druhy částic. Tyto síly jsou stejného druhu jako síly, které způsobují kondenzaci par, a které jsou zodpovědné za existenci kondenzovaného stavu látek. Fyzisorpce probíhá na celém povrchu pevné látky. Nastává vždy, je-li adsorptiv uveden do kontaktu s povrchem adsorbentu. To je také důvod, proč je fyzikální adsorpce vhodná pro určování povrchu adsorbentů. Je méně selektivní než chemisorpce. To znamená, že vlastnosti adsorbovaných látek nemají vliv na jejich zachytávání na povrchu adsorbentu. Nejdříve se povrch postupně pokrývá molekulami tekutiny do chvíle, než je pokryt celý povrch adsorbentu adsorbátem. Tento stav charakterizuje vytvoření tzv. monovrstvy, na níž se pak zachycují další vrstvy adsorbátu (vícevrstvá adsorpce). Celková tloušťka vrstvy je dána dosahem van der Waalsových sil. Rychlost fyzikální adsorpce, kterou v podstatě charakterizuje rychlost dosažení rovnováhy, je v praxi zpravidla modelována jako okamžitá. [9]

Rychlost adsorpce lze měřit pouze při velmi nízkých hodnotách tlaku. Fyzisorpce na rozdíl od chemisorpce je děj vratný. To znamená, že adsorbovanou látku lze velmi snadno desorbovat a uvolnit tak adsorptiv v původní formě. Fyzikální adsorpce je děj exotermický, uvolňuje se tzv. adsorpční teplo, které je 1,5 ÷ 3krát větší než příslušné teplo kondenzační. [9]

#### *Chemická adsorpce (chemisorpce)*

Mezi molekulami adsorbátu a molekulami povrchu adsorbentu vzniká nová chemická vazba. Chemisorpce probíhá na tzv. aktivních centrech, tedy na místech povrchu látky, která mají vyšší energii potřebnou k vytvoření chemické vazby. Chemisorpci je možné adsorbovat pouze jednu vrstvu molekul, protože pro vznik vazby je potřeba přímý kontakt povrchu a molekuly. Adsorpční tepla při chemické adsorpci jsou řádově rovna reakčnímu teplu. Tento typ adsorpce je nevratný. Desorpce adsorbátu může vést k uvolnění jiné látky, než se původně adsorbovala.

Nevratná chemická adsorpce se vyznačuje vysokou mírou vzájemného působení molekuly a povrchu pevné látky, tedy velkým interakčním potenciálem. To má za následek vysoké hodnoty adsorpčních tepel uvolňovaných v průběhu adsorpce. Systém při chemisorpčním procesu nemá často dostatek tepelné energie k účinnému překonání aktivační bariéry, jehož následkem je nesnadné docílení termodynamické rovnováhy. [9]

Přehledné porovnání vybraných vlastností fyzikální a chemické adsorpce ukazuje následující tabulka 3.

Tabulka 3 Základní vlastnosti a charakteristiky fyzikální a chemické adsorpce [2]








Vlastnost	Fyzikální adsorpce	Chemická adsorpce
charakter adsorbované vrstvy	monovrstva vícenásobné vrstvy kondenzovaný stav v pórech	monovrstva
charakter vzájemného působení	van der Waalsovy síly	sdílení elektronů, tvorba chemických vazeb
adsorpční teplo	nízké, zhruba 1,5 ÷ 3násobek tepla kondenzačního	vysoké, více jak 5násobek kondenzačního tepla
kinetika ustalování rovnováhy	vysoká, proces obvykle není aktivovaný	nízká, se vzrůstající teplotou exponenciálně roste, vykazuje významnou aktivační energii
desorpce	<b>snadná a vratná</b> , stačí snížit tlak či <b>mírně zvýšit teplotu</b>	obtížná a často nevratná, obvykle nutné zvýšit teplotu systému a to někdy velmi výrazně (i více než na 400 °C)
rozsah adsorbovaných množství	<b>„neomezený“</b> , množství jsou vysoká, se vzrůstajícím tlakem limituje do $\infty$ (objemová kondenzace)	maximální adsorbovatelné množství je dáno počtem adsorpčních center, vykazuje zřejmou limitu



### 2.3.4 MATERIÁLY VYUŽÍVANÉ PRO SUŠENÍ VZDUCHU

Firma Munters rozděljuje adsorpční rotory pod ochrannou známkou HoneyCombe™ následovně:

Tabulka 4 Nabídka rotorů od firmy Munters [28]

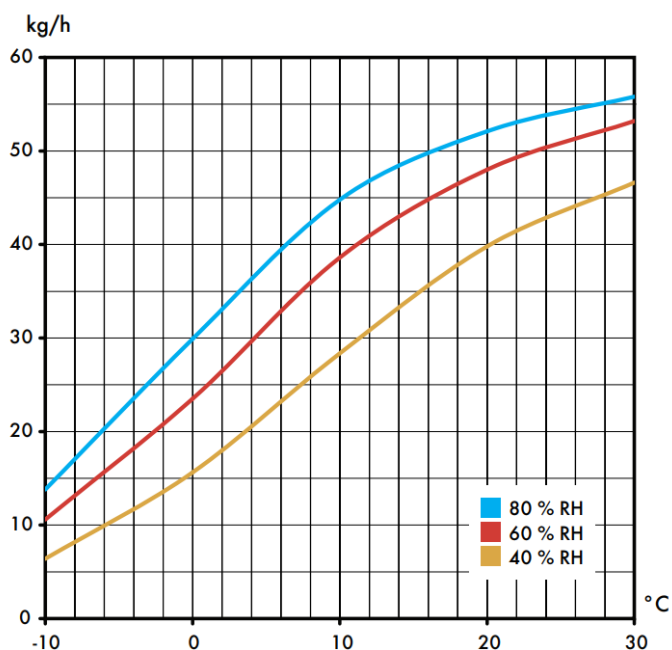
Název	Popis
<b>HPS</b> 	Adsorbentem je titanový silikagel. Poskytuje ideální výkon sušení v širokém rozsahu aplikací. Je omyvatelný a chemicky odolný.
<b>Lithium Chloride</b> 	Chlorid lithný je extrémně silný absorbent, jehož hlavní výhodou jsou nízké provozní náklady. Má bakteriostatické vlastnosti (snižuje počet organismů ve vzduchu). Je chemicky odolný.
<b>GTR (Quantum™)</b> 	GTR je adsorbent, který je zvláště efektivní v aplikacích, které využívají 100 % vnějšího vzduchu. Je omyvatelný a chemicky odolný.
<b>HPX</b> 	HPX je adsorbent, který zajišťuje velmi nízký rosný bod (-56 °C a nižší). Vhodný pro udržování RH 1 ÷ 2 %. Je omyvatelný a chemicky stabilní.
<b>HCR</b> 	HCR je adsorbent, který se používá pro aplikaci nízkoteplotního vzduchu pro reaktivaci. Je omyvatelný a chemicky stabilní.
<b>Molecular Sieve</b> 	Molekulární síto je pevný adsorbent využívaný pro dosažení extrémně nízkého rosného bodu (-40 °C až -62 °C). Je omyvatelný a chemicky stabilní.
<b>Hydrophobic Zeolites</b> 	Zeolit poskytuje několik charakteristik, které jsou ideální pro snížení VOC (volatile organic compound – zdraví škodlivé látky). Je nehořlavý, umožňuje použití vysoké teploty při reaktivaci.

### 2.3.5 UŽITÍ ADSORPČNÍHO ROTORU PRO ODVLHČOVÁNÍ

Adsorpční odvlhčovače mají větší rozsah provozních teplot než odvlhčovače kondenzační. Níže je uvedeno zařízení (obrázek 20), které zvládá zpracovávat vzduch o teplotě -20 °C až 40 °C. Výkon odvlhčování není konstantní hodnota, je závislá na teplotě vstupního vzduchu a relativní vlhkosti (viz grafické znázornění na obrázku 21).



Obrázek 20 Adsorpční odvlhčovač MX<sup>2</sup> 95 od firmy Munters [29]



Obrázek 21 Závislost výkonu odvlhčování na teplotě vstupního vzduchu do jednotky MX<sup>2</sup> pro různou relativní vlhkost (40, 60 a 80 %) [29]

Další technické parametry jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5 Technické parametry odvlhčovače MX<sup>2</sup> firmy Munters [29]

Výkon odvlhčování při -10 °C, 60 % RH	264 litrů/den
Provozní teplota	-20 ÷ 40 °C
Objem průtoku vzduchu	9 500 m <sup>3</sup> /h
Příkon	69,5 kW
Hlučnost	73 dB
Rotor	HPS s obsahem síry max. 30 ppm
Spotřeba plynu	5,91 m <sup>3</sup> /h

### 3 ODVLHČOVÁNÍ V CHLADÍRNÁCH A MRAZÍRNÁCH

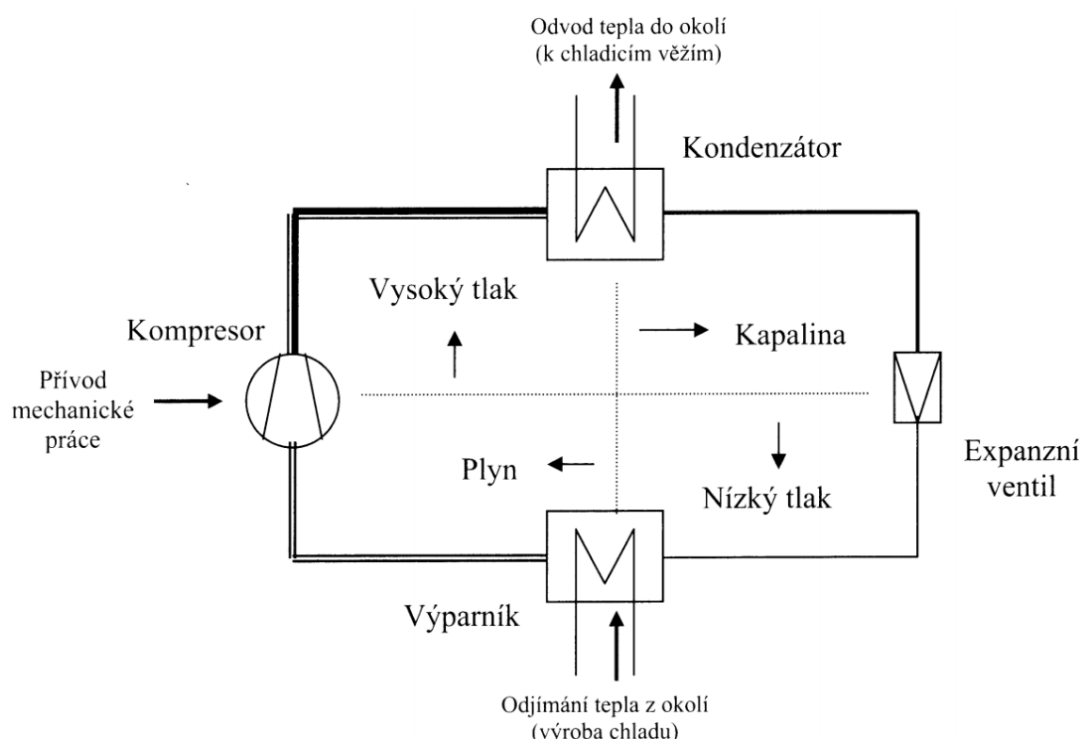
#### 3.1 REGULOVANÝ TEPLOTNÍ REŽIM

Mrazírny a chladírny musejí splňovat hygienická opatření, která jsou v potravinářském sektoru obzvláště přísná. Správná teplota skladování je potřebná k zachování zdravotní nezávadnosti potravin. Provozovatelé by tak měli zajistit, aby byl k dispozici adekvátní řízený teplotní režim, který jednotlivé druhy potravin vyžadují. Ten se liší v závislosti na druhu skladovaného zboží, a to i v rámci jednoho typu produktu. [36]

Při chlazení nesmí teplota čerstvého masa přesáhnout 7 °C, drůbeží maso vyžaduje teplotu maximálně 4 °C. Mleté maso se zase uchovává do teploty 2 °C. Ideální mikroklima pro skladování zmrazeného masa představuje teplota do -12 °C. U zvěřiny a ryb se teplota pohybuje dokonce mezi -30 až -35 °C. Pro mléčné výrobky je optimální teplota 2 až 8 °C, pro skladování ovoce a zeleniny by se měly využívat chladicí prostory s teplotou 6 až 10 °C, v případě mražení pak teploty v rozmezí -18 až -23 °C. [36]

V mraziřenském a chladířenském provozu nastává velký teplotní spád v porovnání s teplotou okolního prostředí, kdy v chlazeném prostoru je vyžadována teplota nižší. Aby mohlo být teplo, které je odváděno z těchto prostor, předáno jiné látce, musí dojít k vynaložení určité práce. Zařízením vykonávající tuto práci je *chladicí okruh* (obrázek 23), který tvoří technologii mraziřenských objektů. Jeho schéma je vyobrazeno na obrázku 22. [10]

Strojní chladicí zařízení, které funguje na principu změny skupenství chladiva, je běžně složeno ze čtyř základních částí: 1. kompresoru, 2. kondenzátoru, 3. expanzní součásti, a 4. **výparníku**. [10]



Obrázek 22 Schéma kompresorového chladicího cyklu s výparníkem [11]





Obrázek 23 Chladírenská sestava pro chladírenské a mrazírenské aplikace [24]

### 3.2 PROBLÉMY VLHKÉHO VZDUCHU

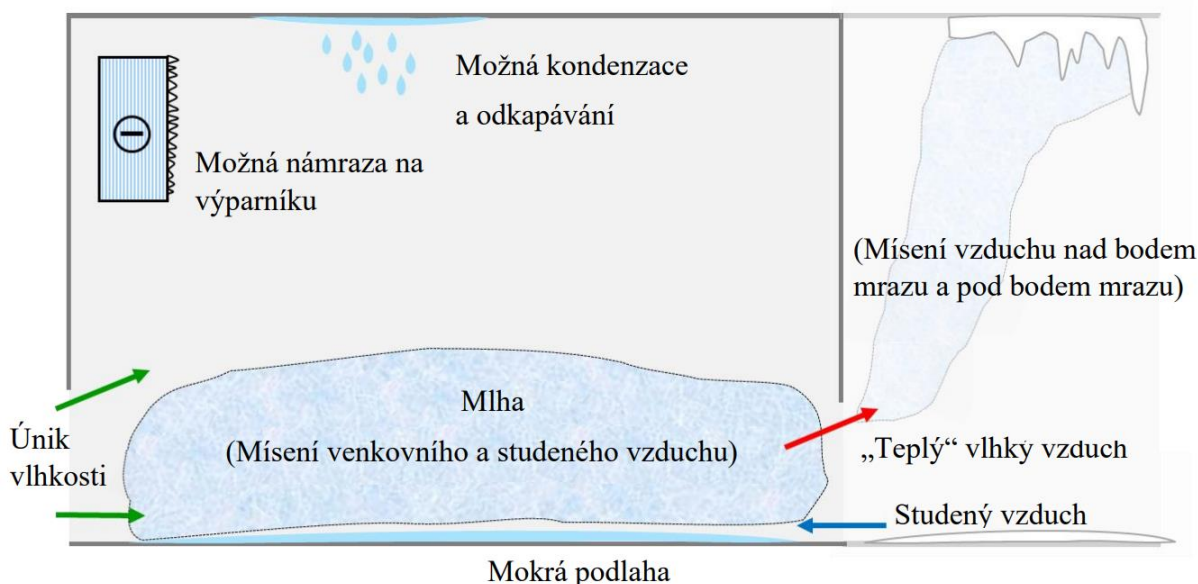
Vzdušná vlhkost může způsobovat problémy v prostorech, jejichž teplota se pohybuje kolem bodu mrazu či pod bodem mrazu. K takovým podmínkám dochází v chladírnách nebo mrazírnách. Vlivem rozdílu měrné vlhkosti v okolním vzduchu a vzduchu v těchto prostorech voda začne kondenzovat. To v chladném prostředí vede k tvorbě ledu, sněhu, námrazy a mlhy (obrázek 24). Podrobněji o problémech vlhkého vzduchu v kapitolách 3.2.1 – 3.2.3. [25]



Obrázek 24 Názorná ukázka namrzání vzdušné vlhkosti v mrazírně [25]

### 3.2.1 CHLADÍRNY

V chladírnách nebo také v nakládacích docích, kde se teplota vzduchu udržuje nad bodem mrazu, dochází k tvorbě mlhy. Důvodem je mísení venkovního vzduchu se studeným vzduchem v mrazírně. Vzdušná vlhkost, která je do tohoto prostoru vpuštěna, způsobuje také kondenzaci vody na stropě, která pak odkapává a smáčí podlahu, případně produkty, které jsou zde uskladněny. Může docházet i k namrzání výparníku. Názorná ukázka viz obrázek 25.



Obrázek 25 Chladárna s teplotou nad bodem mrazu; vpravo část mrazírny [16]

Mezi hlavní problémy vlhkého vzduchu v prostoru chladírny patří: [16]

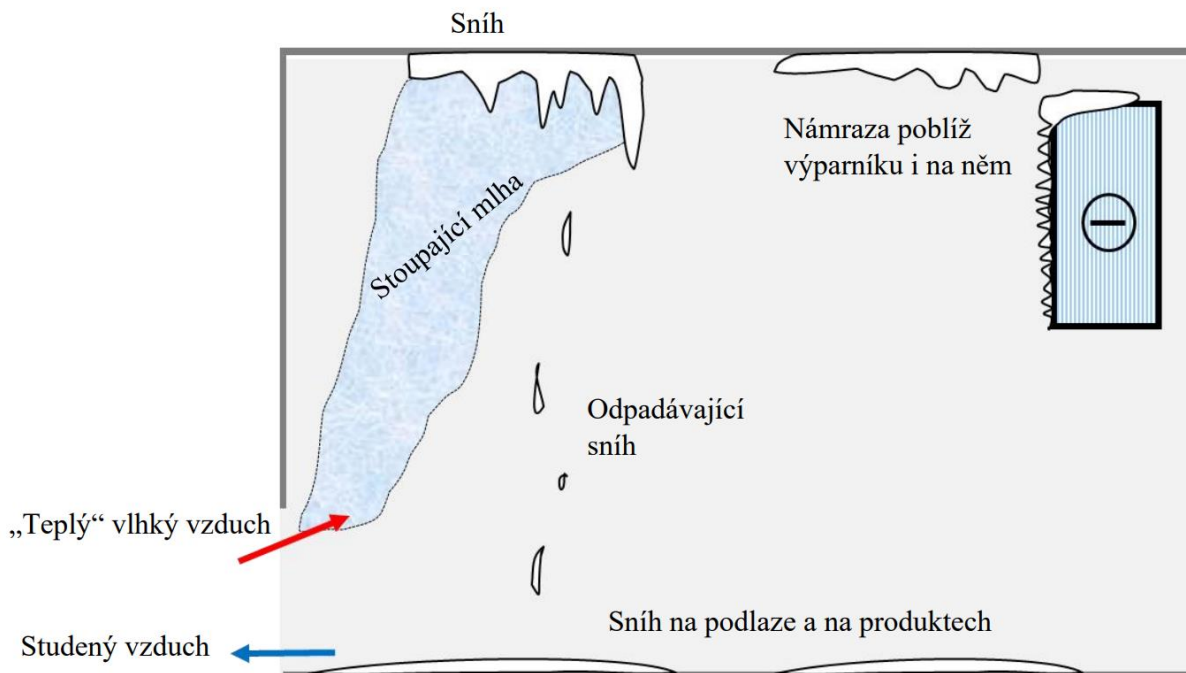
- tvorba mlhy
- kondenzace vody a odkapávání na podlahu
- mokré a kluzké podlahy
- tvorba námrazy na výparnících
- snížení chladicího výkonu EER



Obrázek 26 Uskladňování produktů v chladírně [16]

### 3.2.2 MRAZÍRNY

V mrazírnách, kde se teplota vzduchu udržuje pod bodem mrazu, dochází k tvorbě mlhy, která je způsobena mísením teplejšího vlhkého vzduchu se studeným vzduchem mrazírny. Stoupající mlha se usazuje na okolních površích a vytváří vrstvu sněhu, která částečně odpadáva na podlahu a vytváří tak kluzkou plochu. Námraza vzniká i v okolí výparníku, což zhoršuje jeho chladicí výkon. Názorná ukázka viz obrázek 27.



Obrázek 27 Mrazírna s teplotou pod bodem mrazu [42]

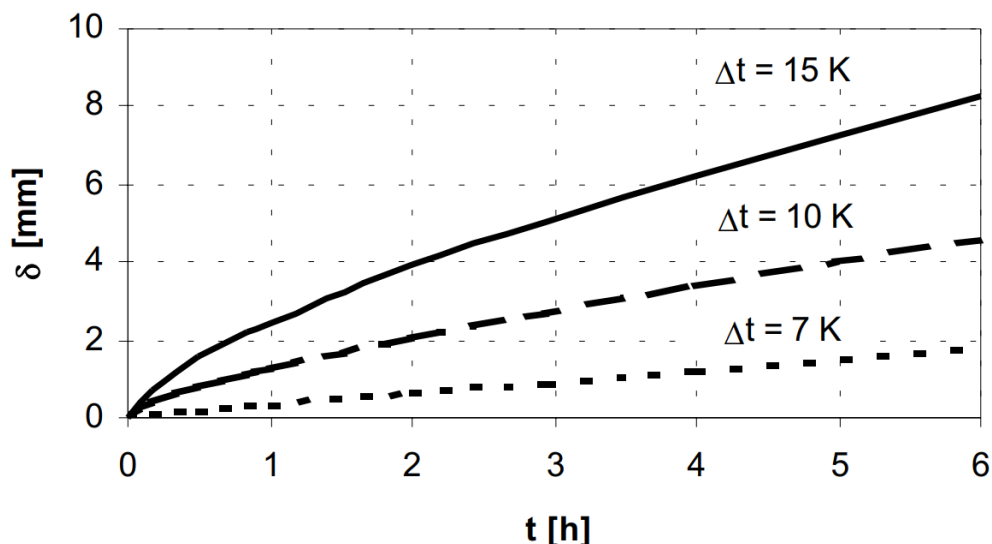
Mezi hlavní problémy vlhkého vzduchu v prostoru mrazírny patří: [39]

- tvorba mlhy
- tvorba sněhu
- zamrznuté a kluzké podlahy
- tvorba námrazy na výparnících
- snížení chladicího výkonu EER
- tvorba ledu na váhových strojích
- námraza na dopravních pásech
- špatná čitelnost čárových kódů

Odstraňování ledu probíhá aktivní formou pomocí sublimace. Při použití odvlhčovacího zařízení dochází k výraznému poklesu tvorby námrazy. Zvyšuje se tím bezpečnost, neboť podlahy nebudou kluzké, sníží se množství mlhy a námrazy na vstupních vratech. V některých případech dokonce není nutné mrazírny odmrazovat (závisí na okolnostech). [16]

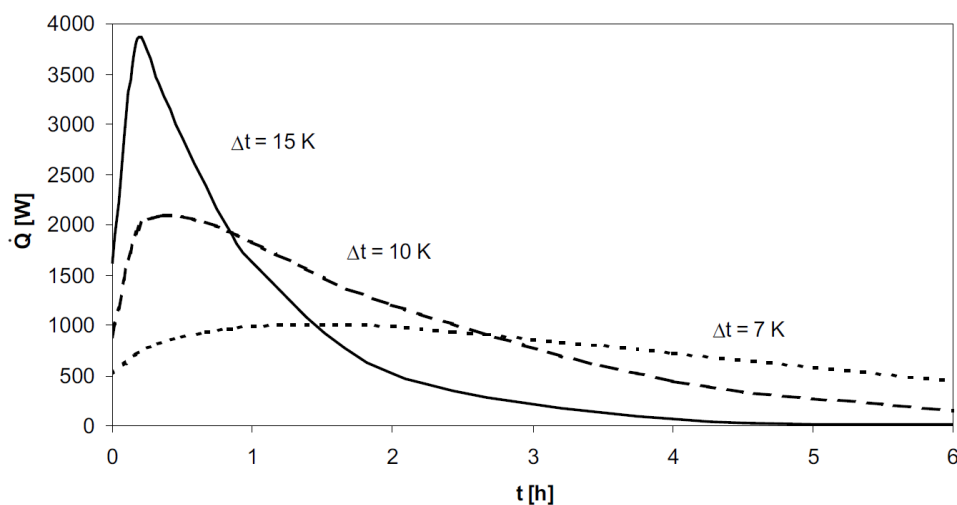
### 3.2.3 NAMRZÁNÍ VÝPARNÍKU

Vzdušná vlhkost i teplotní rozdíly ovlivňují rychlost tvorby námrazy na výparníku, což má za následek větší spotřebu elektrické energie. Na obrázku 28 je znázorněna rostoucí vrstva námrazy na výparníku pro různé  $\Delta t$ , což je teplotní rozdíl mezi výparníkem a okolním vzduchem. Námraza roste rychleji pro větší teplotní rozdíly, z čehož plyne dřívejší odmrazování výparníku, případně několik periodických odmrazování za sebou. [17]



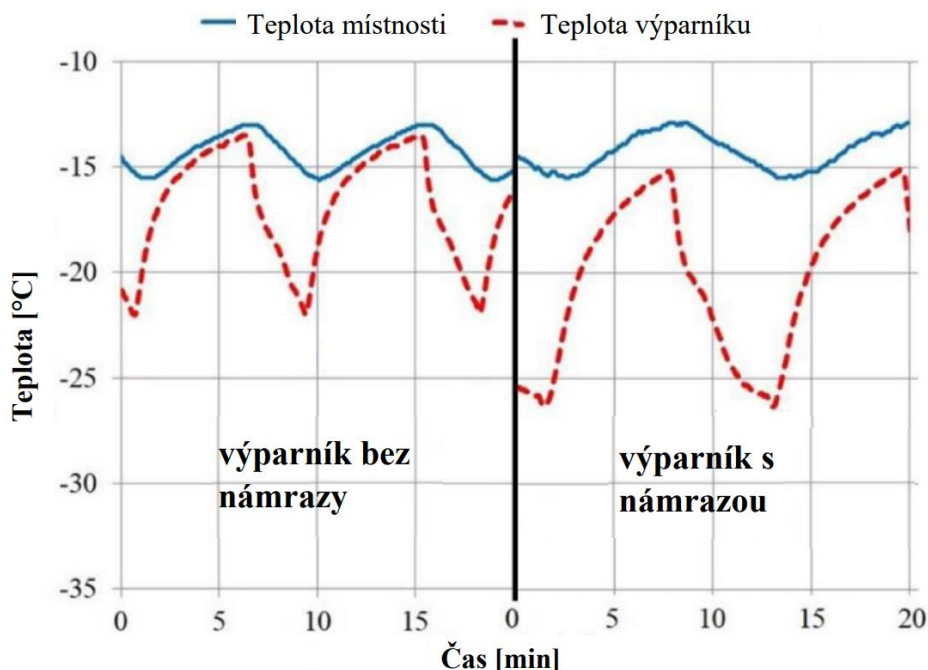
Obrázek 28 Rostoucí vrstva námrazy v čase [17]

Znázornění výkonu namrzacího výparníku v průběhu času je na obrázku 29. Na začátku chlazení dochází k nárůstu výkonu. V publikaci D. Žihery [17] je uvedeno, že důvodem počátečního prudkého nárůstu kapacity výparníku je to, že mráz zvýšil drsnost povrchu lamel, což způsobilo silnou turbulenci vzduchu a zvýšil se koeficient přenosu tepla mezi vzduchem a zamrzlou oblastí. Pak vrstva námrazy dále narůstá a tím se zvyšuje odolnost proti přenosu tepla. To způsobuje prudký pokles jeho výkonu. [17]



Obrázek 29 Závislost času a výkonu výparníku během namrzání [17]

Udržování vnitřní teploty komory na  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  je znázorněno na obrázku 30. Na levé straně je provoz s čistým výparníkem bez námrazy, vpravo s námrazou. Na první pohled je patrné, že teplota výparníku v provozu s námrazou má výrazně nižší teplotu, čímž dorovnáva jeho nižší chladicí výkon a spotřebovává tak více elektrické energie.



Obrázek 30 Chlazení vzduchu na teplotu  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  [23]

K popsání účinnosti chladicího zařízení se využívá EER (Energy Efficiency Ratio): [7]

$$\varepsilon_C = \frac{Q_R}{W} [-] \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{CC} = \frac{T_R}{T_C - T_R} [-], \quad (3.2)$$

kde  $Q_R$  [W] je chladicí výkon na výparníku,  $W$  [W] je příkon chladírenské sestavy a  $T_R$  a  $T_C$  [K] jsou termodynamické teploty vypařovací a kondenzační. Rovnice (3.2) se využívá pro ideální nebo teoretické výpočty. [7]

Tepelný tok, který je přenášen přes stěnu výparníku se počítá jako: [17]

$$\dot{Q}_S = k \cdot A_O \cdot (t_a - t_R) [W], \quad (3.3)$$

kde  $k$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ] je součinitel prostupu tepla,  $A_O$  [ $\text{m}^2$ ] vnější plocha výparníku a  $t_a$  a  $t_R$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] jsou teploty okolního vzduchu a vypařovací. [17]

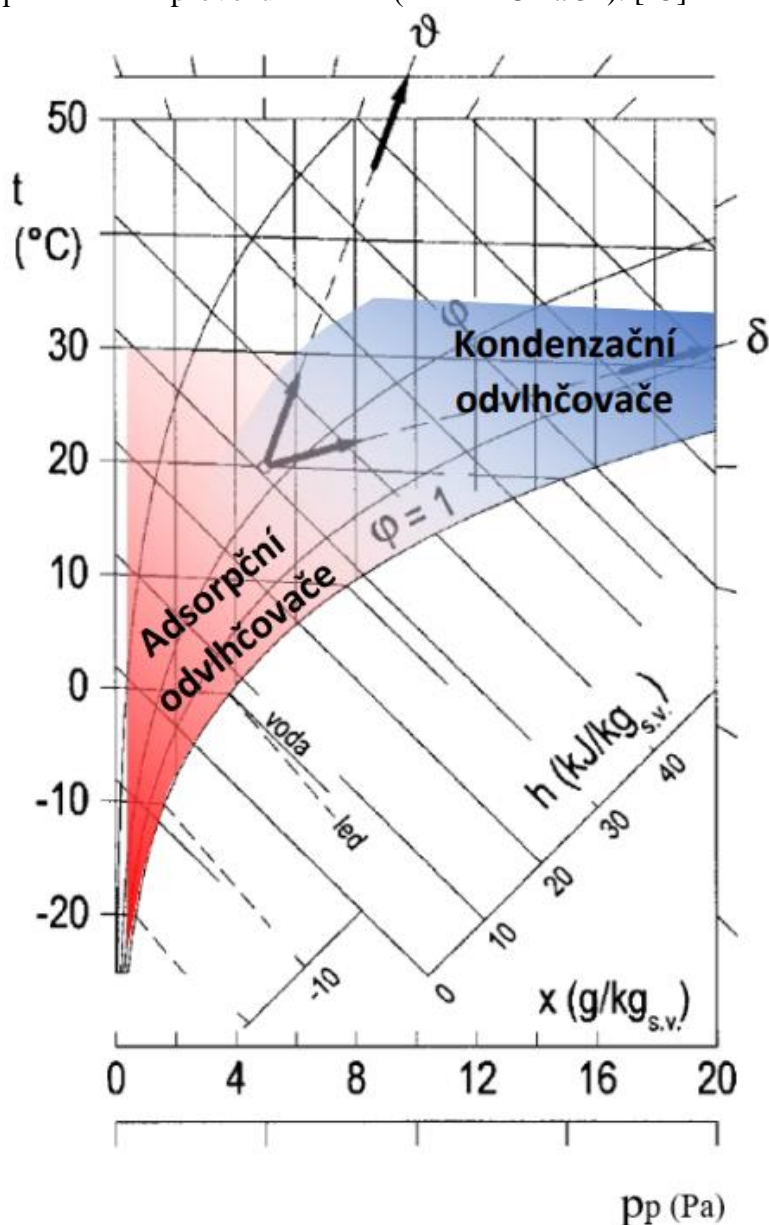


### 3.3 VÝBĚR VHODNÉHO ZAŘÍZENÍ PRO ODVLHČOVÁNÍ

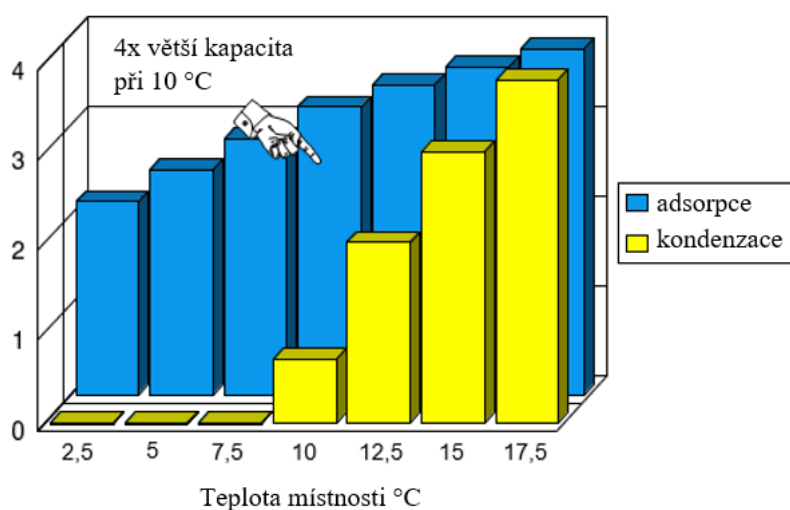
Odvhlčení pomocí kondenzace je nejběžnější metodou pro teploty vzduchu nad cca 16 °C a hodnoty relativní vlhkosti cca nad 35 %. Provoz při nižších teplotách znamená výraznou ztrátu účinnosti. Dosažení nižších vlhkostí by bylo možné pouze snižováním teploty chladicího média, které by postupně vyvolávalo namrzání výměníku. [15]

Adsorpční princip odvlhčování umožňuje provoz při nízkých teplotách s možností dosažení měrné vlhkosti až na teplotu rosného bodu okolo -60 °C [9]. Účinnost adsorpčního odvlhčování klesá s rostoucí teplotou, navrhování těchto zařízení pro trvalý provoz nad 30 °C prakticky nemá význam bez zařazení předchladiče. [15]

Adsorpční a kondenzační princip se doplňují v rozsahu a účinnosti odvlhčení a správná volba metody závisí na požadavcích provozu zařízení (obrázek 31 a 32). [15]





Obrázek 31 Rozsah použití adsorpčních a kondenzačních odvlhčovačů [6,15]



Obrázek 32 Kapacita odvlhčování při 50% RH [16]

V případě chladiřů a mrazířů, kde se teplota pohybuje okolo  $-35 \div 10$  °C, je vhodné používat adsorpční odvlhčovače. Pro tyto aplikace je vybráno několik zařízení v tabulkách 6 a 7.

Tabulka 6 Adsorpční odvlhčovače využívané k odstranění vlhkosti v chladných prostředích (část 1)

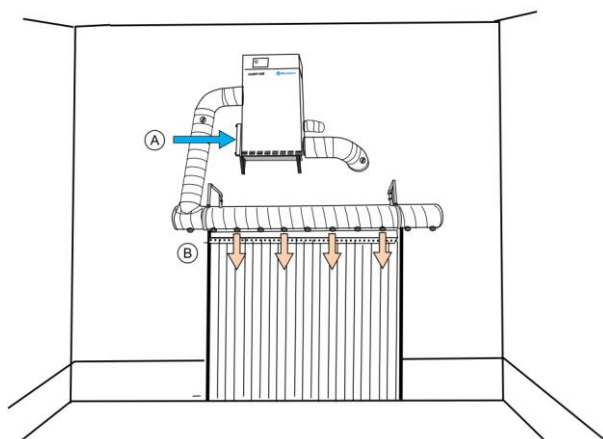
	Výrobce a řada	COTES C35C [34]
	Objem vzduchu	1 000 m <sup>3</sup> /h
	Výkon odvlhčování při -25 °C 90 % RH	0,4 kg/h
	Příkon	5,3 kW
	Výrobce a řada	Munters IceDry 1400 [30]
	Objem vzduchu	1 400 m <sup>3</sup> /h
	Výkon odvlhčování při -25 °C 90 % RH	1,08 kg/h
	Příkon	8,7 kW

Tabulka 7 Adsorpční odvlhčovače využívané k odstranění vlhkosti v chladných prostředích (část 2)

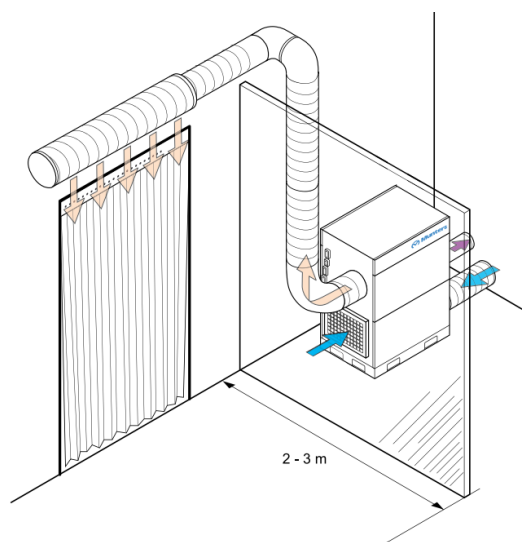
	Výrobce a řada	<b>TROTEC TTR 1400</b> [31]
	Objem vzduchu	1 750 m <sup>3</sup> /h
	Výkon odvlhčování při -20 °C 90 % RH	0,9 kg/h [17]
	Příkon	9,8 kW
	Výrobce a řada	<b>Danvex AD-1500</b> [35]
	Objem vzduchu	1 500 m <sup>3</sup> /h
	Výkon odvlhčování při 20 °C 60 % RH	24 kg/h
	Příkon	14,7 kW
	Výrobce a řada	<b>AFIM DRY 1000</b> [32]
	Objem vzduchu	1 000 m <sup>3</sup> /h
	Výkon odvlhčování při 20 °C 60 % RH	10 kg/h
	Příkon	14,8 kW



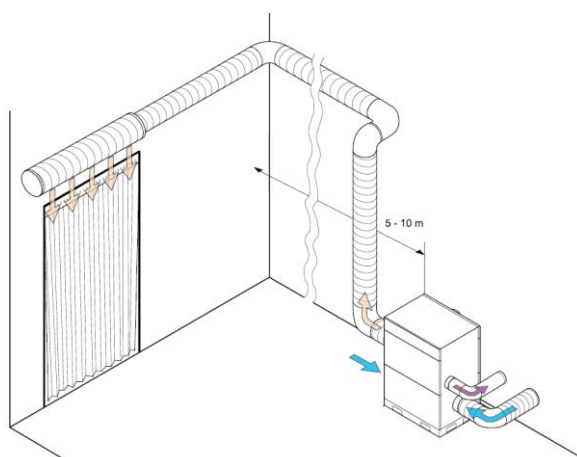
Odvhlčovací jednotka bývá umístěna v technické místnosti nebo přímo v chladírně nebo mrazírně, pokud to dispozice komory a výrobce jednotek umožňuje. Z obrázků 33 - 36 je patrné, že vstup procesního vzduchu (modré šipky vstupující do levé strany jednotky) by neměl být poblíž vstupních dveří, aby nedocházelo k nasávání venkovního vzduchu. V případě obrázku 33 lze jednotku pověsit nad dveře. Pokud to výškové rozměry neumožňují, lze jednotku umístit za zástěnu o šířce 2 - 3 m, která vytváří clonu mezi jednotkou a vstupními dveřmi (obrázek 34). Nebo lze jednotku umístit podél stěny, musí však být dodržena vzdálenost vstupu procesního vzduchu od dveří 5 - 10 metrů (obrázek 35 a 36). Odvhlčený vzduch pak ve všech případech rovnoměrně vystupuje z potrubí nad dveřmi směrem dolů (oranžové šipky).



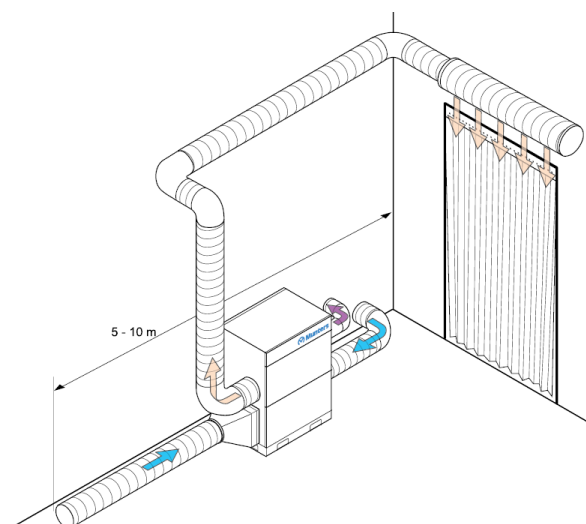
Obrázek 33 Pozice nad dveřmi [26]



Obrázek 34 Pozice za zástěnou [26]



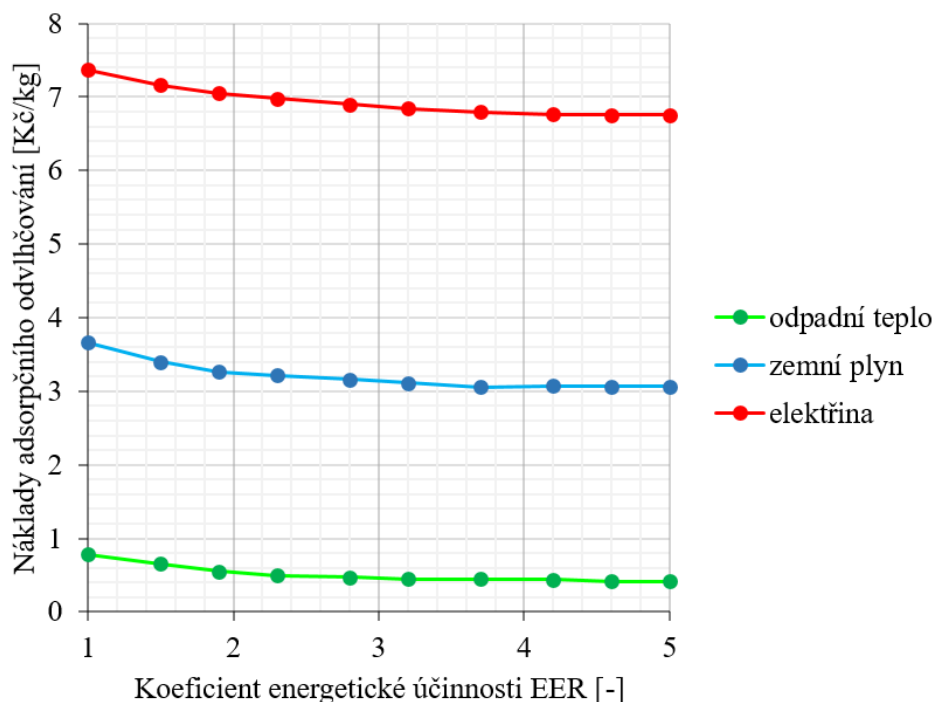
Obrázek 35 Pozice daleko od dveří [26]



Obrázek 36 Přívod procesního vzduchu daleko od dveří [26]

### 3.3.1 ZDROJ TEPLA REGENERAČNÍHO VZDUCHU

Adsorpční odvlhčovací jednotky mohou používat různé zdroje tepla pro ohřev regeneračního vzduchu. Porovnání nákladů adsorpčního odvlhčovače k odstranění 1 kg ledu vyčíslila firma Cotes a graficky znázornila ve své firemní brožuře [20] (obrázek 37).



Obrázek 37 Náklady adsorpčního odvlhčovače při použití různých zdrojů tepla [20]

V některých případech lze využít odpadní teplo a ohřívat tak rotor téměř s nulovými náklady. Pokud to provozní podmínky neumožňují, lze se rozhodnout mezi plynovým hořákem nebo elektrickým výměníkem. Cena 1 MWh zemního plynu je přibližně 1 520 Kč [33] a cena elektřiny pro 1 MWh je okolo 5 781 Kč. [19]

V případě, kdy je potřeba odvlhčovat 10 kg/h, při EER=2, 8700 hodin za rok, jsou náklady vyčísleny s použitím hodnot na obrázku 37 pro všechny dostupné zdroje tepla následovně:

$$\text{Odpadní teplo: } 0,55 \text{ [Kč/kg]} \cdot 10 \text{ [kg/h]} \cdot 8\,700 \text{ [h/rok]} = 47\,850 \text{ [Kč/rok]} \quad (3.4)$$

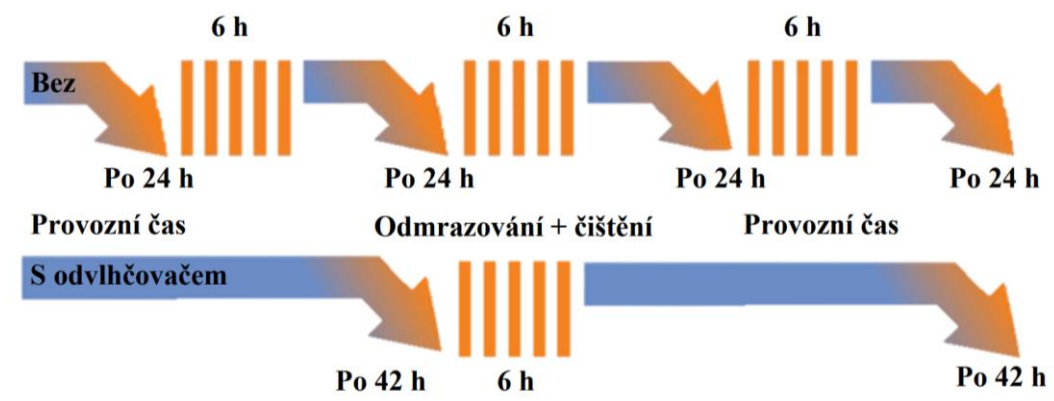
$$\text{Zemní plyn: } 3,25 \text{ [Kč/kg]} \cdot 10 \text{ [kg/h]} \cdot 8\,700 \text{ [h/rok]} = 282\,750 \text{ [Kč/rok]} \quad (3.5)$$

$$\text{Elektřina: } 7,05 \text{ [Kč/kg]} \cdot 10 \text{ [kg/h]} \cdot 8\,700 \text{ [h/rok]} = 613\,350 \text{ [Kč/rok]} \quad (3.6)$$

Z toho vyplývá, že nejvýhodnější způsob ohřevu regeneračního vzduchu je odpadním teplem. Ne vždy je to možné, a proto je často využíván způsob ohřevu zemním plynem, kde úspory oproti elektrickému ohřevu jsou více než dvojnásobné.

### 3.3.2 NÁKLADY NA ODMRAZOVÁNÍ A ČIŠTĚNÍ

V mrazírnách, které nevyužívají odvlhčování vzduchu, dochází k častějšímu namrzání a proto je potřeba v pravidelných intervalech odmrazovat a čistit mrazicí prostory. V některých případech k tomu dochází po 24 hodinách provozu (obrázek 38). S použitím adsorpčního odvlhčovače se výrazně prodlouží provozní čas a tím dochází k úspoře času i elektrické energie. [40]



Obrázek 38 Znárodnění periodického odmrazování (může se lišit pro různé provozy) [16]

#### Odmrazování a čištění bez použití adsorpčního odvlhčovače:

Pro výpočet nákladů spojených s odmrazováním a čištěním je uvažováno 20 h/týden pro jednoho zaměstnance, který tento proces vykonává. Mzdové náklady zaměstnance včetně odvodů jsou přibližně 200 Kč/h. [22] Z toho plynou přibližné roční náklady:

$$20 [h] \cdot 200 [Kč] \cdot 52 [týdnů] = 208\,000 [Kč/rok] \quad (3.7)$$

Cenu za elektrické odmrazování výparníku lze stanovit z příkonu elektrického odtávání, který je uveden v technických listech. Pro příklad byl vybrán výparník Luvata s příkonem elektrického odtávání 5,04 kW. [37] Jestliže odmrazování trvá 20 hodin týdně, pak roční spotřebu lze spočítat:

$$20 [h] \cdot 5,04 [kW] \cdot 52 [týdnů] = 5\,241,6 [kWh/rok] \doteq 5,24 [MWh/rok] \quad (3.8)$$

Dle ceny za 1 MWh (viz 3.3.1) je cena roční spotřeby:

$$5\,781 [Kč] \cdot 5,24 [MWh/rok] \doteq 30\,292 [Kč/rok] \quad (3.9)$$

Dále je třeba započítat i ostatní náklady, které jsou spojené s odmrazováním, jako je dodatečné tepelné zatížení, které vyjde přibližně na 5 000 Kč ročně.

Celkové roční náklady na odmrazování a čištění tedy vyjdou kolem 243 292 Kč pro menší komoru s jedním výparníkem Luvata.

#### Odmrazování a čištění s použitím adsorpčního odvlhčovače:

Při použití adsorpčního odvlhčovače je tento proces eliminován na minimum, náklady s ním spojené jsou tedy několikanásobně nižší. Na obrázku 39 je zachycen stav před použitím adsorpčního odvlhčovače a následně po montáži a uvedení do provozu. [40]



Obrázek 39 Vlevo mrazírna bez použití adsorpčního odvlhčovače, vpravo s odvlhčovačem [16]



Obrázek 40 Zamrznutí výparníku a okolního prostředí [16]

## ZÁVĚR

Vlhký vzduch způsobuje v chlazených prostorách řadu problémů. Nejzávažnější z nich je namrzání teplosměnných ploch výparníků chladicích zařízení, čímž dochází k poklesu jejich účinnosti a nárůstu provozních nákladů. Aby se tomu předcházelo, je vzduch v chlazených prostorách odvlhčován.

Snížení vlhkosti vzduchu je v průmyslové praxi nejčastěji realizováno dvěma způsoby. Prvním způsobem je kondenzační sušení vzduchu, při kterém vlhký vzduch prochází přes výparník chladicího zařízení, jehož teplota je udržována pod teplotou rosného bodu. Na výparníku tak dochází ke kondenzaci vzdušné vlhkosti, která je následně odváděna. Limitujícím faktorem tohoto způsobu je povrchová teplota výparníku, která musí být udržována nad 0 °C, jinak by vzdušná vlhkost na jeho povrchu namrzala. Kondenzační sušičky tak nejsou schopny vzduch dostatečně odvlhčit pro chlazené prostory s teplotou nižší jak 3 °C.

Pro dosažení nižších teplot rosného bodu vysoušeného vzduchu jsou používány adsorpční sušičky. Tato zařízení využívají procesu zvaného fyzikální adsorpce. Principem jsou fyzikální van der Waalsovy přitažlivé síly, které působí mezi všemi druhy částic. Vzdušná vlhkost se tedy naváže na povrch adsorbentu, který je následně regenerován teplotou až 75 °C a navázaná vlhkost se vypaří a odvede mimo chlazený prostor. Adsorpční jednotky zvládají odvlhčovat vzduch až o teplotě okolo -60 °C.

Na základě těchto skutečností lze konstatovat, že jedinou vhodnou technologií pro odvlhčování vzduchu v prostorách s nízkou teplotou jsou adsorpční sušičky vzduchu.

Příklad využití adsorpční sušičky vzduchu, včetně odhadu dosažených úspor je uveden v kapitole 3.3, kde je vybráno pět konkrétních zařízení, která jsou určena pro provoz při nízkých teplotách. Pro srovnání jsou uvedeny parametry objemu vysušovaného vzduchu [m<sup>3</sup>/h], odvlhčovacího výkonu [kg/h] a celkového elektrického příkonu zařízení [kW]. Odvlhčovací výkon [kg/h] se u vybraných výrobků velmi liší. To je způsobeno především měřeními při různých teplotních a vlhkostních podmínkách procesního vzduchu.

Stanovení provozních nákladů odvlhčovače je uvedeno v kapitole 3.3.1., kde jsou porovnány různé zdroje tepla pro ohřev regeneračního vzduchu. Nejefektivnější je využití odpadního tepla, kde náklady na provoz modelové jednotky vycházejí 47 850 Kč/rok. Dalším výhodným zdrojem tepla je spalování zemního plynu, které vychází na 282 750 Kč/rok a nejméně výhodným zdrojem je elektřina, resp. elektrický výměník, kde se cena pohybuje okolo 613 350 Kč/rok.

Provoz adsorpčního odvlhčovače zajišťuje čisté prostředí, které šetří firemní náklady spojené nejen s odmrazováním a čištěním, ale také se spotřebou elektrické energie, která souvisí s namrzáním výparníku. Příklad stanovení nákladů na odmrazování a čištění komory mrazírny je uveden v kapitole 3.3.2.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BALÍK, Michael, Günter GEBAUER a Helena HORKÁ. *Odvhlčování staveb: cvičení, ateliárová tvorba*. 2., přeprac. vyd. Praha: Grada, 2008, 307 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-2693-9.
- [2] BULÁNEK, Roman. *Povrchové jevy na pevných látkách*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014 ISBN 978-80-7395-908-1
- [3] ÇENGEL, Yunus A. a Michael A. BOLES. *Thermodynamics: an engineering approach*. 5rd ed. Boston: WCB/McGraw-Hill, 2006. McGraw-Hill series in mechanical engineering. ISBN 978-0-07-288495-1
- [4] DITL, Pavel. *Difúzně separační pochody*. 3. Praha. Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03972-4.
- [5] DRKAL, František a Vladimír ZMRHAL. *Větrání*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 9788001063781.
- [6] DRKAL, F., LAIN, M., SCHWARZER, J., ZMRHAL, V. *Klimatizace a průmyslová vzduchotechnika*. Přednáškové texty pro studijní program Inteligentní budovy. 2009. Dostupné z: <http://www.ib.cvut.cz/>
- [7] CHYSKÝ, J.; HEMZAL, K. a kol. *Větrání a klimatizace*. Technický průvodce. 3. vyd. Brno: BOLIT-B press, 1993. 490 s. ISBN 80-901574-0-8.
- [8] ŠAFAŘÍK, Pavel a Magda VESTFÁLOVÁ. *Termodynamika vlhkého vzduchu*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-06020-9.
- [9] DANIEL, Marek. *Adsorpční jednotka na výrobu kyslíku*. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT Praha. Fakulta strojní. Vedoucí práce doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D.
- [10] KARMÍN, Luboš. *Možnosti snížení energetické náročnosti objektů s řízenou vnitřní teplotou*. Brno, 2019. 91 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně
- [11] KARAFIÁT, J. *Centralizované zásobování chladem*. Pardubice. Informační příručka Teplárenského sdružení ČR, 2005.
- [12] JANOTKOVÁ, Eva. *Technika prostředí 1. část* [online]. [13. 3. 2021]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/userfiles/Mauder/files/Technika-prostredi-1-cast.pdf>
- [13] JANOTKOVÁ, Eva. *Technika prostředí 2. část* [online]. [14. 3. 2021]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/userfiles/Mauder/files/Technika-prostredi-2-cast.pdf>
- [14] JANOTKOVÁ, Eva. *Vlhký vzduch* [online]. *Větrání a klimatizace I*, prezentace. [cit. 12. 2. 2021] Dostupné z: [https://eu.fme.vutbr.cz/userfiles/Mauder/files/Presentation-IVK-Vlhky\\_vzduch.pdf](https://eu.fme.vutbr.cz/userfiles/Mauder/files/Presentation-IVK-Vlhky_vzduch.pdf)
- [15] ANDRES, Petr. *Odvhlčování pomocí adsorpční technologie DST Seibu Giken* [online]. 18. 6. 2008 [cit. 20. 3. 2021] Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/4918-odvhlcovani-pomoci-adsorbncni-technologie-dst-seibu-giken>

- [16] MOJET, G. *Application v2* [online]. Prezentace. [cit. 20. 2. 2021] Dostupné z: <https://world.munters.com/Menu/Air-Treatment/Training/Sub-pages/AirT-Academy/>
- [17] POREDOŠ, Alojz; ŽIHER, Dejan. *The Effects of Evaporator Frosting on the Energy Consumption for Refrigeration*. Strojníški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 2017. ISSN 0039-2480. Dostupné z: <https://www.sv-jme.eu/article/the-effects-of-evaporator-frosting-on-the-energy-consumption-for-refrigeration>
- [18] SCHWARZER, J. *Hustota vlhkého vzduchu a entalpie* [online]. 12. 6. 2006 [cit. 27.3. 2021]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/3353-teorie-vlhkeho-vzduchu-ii>
- [19] WOFF, Petr. *Jaká je aktuální cena kWh a MWh elektřiny?* [online]. 7. 1. 2021 [cit. 28. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.cenyenergie.cz/jaka-je-aktualni-cena-kwh-a-mwh-elektriny/#/promo-ele-mini>
- [20] Cotes. *Managing humidity in cold store installations* [online]. [cit. 17. 2. 2021] Dostupné z: [https://www.teddington.com/pdf/4/DTC\\_C35C\\_UK.pdf](https://www.teddington.com/pdf/4/DTC_C35C_UK.pdf)
- [21] HB Krako. *Rotor* [Online]. [cit. 17. 2. 2021] Dostupné z: [www.hbkrako.cz/rotor-1/](http://www.hbkrako.cz/rotor-1/)
- [22] Indeed. *Kolik si vydělá skladník v Česku?* [online]. [cit. 5. 3. 2021]. Dostupné z: <https://cz.indeed.com/career/skladnik%C3%ADk/salaries>
- [23] International Journal of Refrigeration. *Frost detection method on evaporator in vapour compression systems* [online]. Volume 110. 2020 [cit. 16. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700719304591>
- [24] KAS. *Chladírenské sestavy* [online]. [cit. 16. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.kas.cz/Chladirenske-sestavy.html>
- [25] Munters. *Ice & Frost Build Up in Cold Stores* [online]. [cit. 6. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.munters.com/en/we-can-help-you-with/icefrost-build-up/>
- [26] Munters. *User manual IceDry 1400* [online]. 2013 [cit. 11. 2. 2021]. Dostupné z: [https://www.munters.com/globalassets/inriver/resources/manual\\_icedry\\_1400\\_en.pdf](https://www.munters.com/globalassets/inriver/resources/manual_icedry_1400_en.pdf)
- [27] Munters. *Industrial Drying* [online]. [cit. 3. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.munters.com/en/areas-of-expertise/industrial-drying/>
- [28] Munters. *HoneyCombe™ Desiccant Wheels* [online]. [cit. 8. 3. 2021]. Dostupné z: [https://www.munters.com/globalassets/pdf-files/components/rotor\\_brochure\\_new\\_d\\_low-res.pdf](https://www.munters.com/globalassets/pdf-files/components/rotor_brochure_new_d_low-res.pdf)
- [29] Munters. *MX<sup>2</sup> 95 Desiccant dehumidifier* [online]. 2020 [cit. 9. 3. 2021]. Dostupné z: [https://www.munters.com/globalassets/inriver/resources/9184\\_AT\\_ProdSheet\\_MX2\\_95\\_en.pdf](https://www.munters.com/globalassets/inriver/resources/9184_AT_ProdSheet_MX2_95_en.pdf)
- [30] Munters. *IceDry® - 1400, Frost free cold stores* [online]. [cit. 3. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.munters.com/globalassets/inriver/resources/products/dehumidifiers/icedry-1400-en.pdf>



- [31] Trotec. *Industrial desiccant dehumidifier TTR 1400* [online]. [12. 2. 2021] Dostupné z: <https://uk.trotec.com/products-services/machines-highperformance/dehumidification/desiccant-dehumidifiers-stationary/ttr1400/>
- [32] *AFIM DRY 1000-2000, Industrial Dehumidifiers* [online]. [cit. 4. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.afim-dehumidifier.com/AFIM-Dehumidifier/Brochure-AFIM-Dry-1000-2000-EN.pdf>
- [33] *Ceny zemního plynu* [online]. 1. 1. 2020 [cit. 28. 3. 2021] Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energi/21635-ceny-zemniho-plynu-platne-od-1-1-2020-do-31-12-2020>
- [34] *Cotes C35C Pro mrazírenská zařízení* [online]. [cit. 2. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.odvlhcovani.cz/upload/adsorp/TECH.%20DATA/C35C.pdf>
- [35] *DanVex AD-1500, Adsorption air dehumidifier* [online]. [4. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.dryairexpert.com/files/EN/DanVexAD1500.pdf>
- [36] *Jaké normy musejí splňovat chladírny a mrazírny?* [online]. 7. 7. 2006 [cit. 5. 2. 2021] Dostupné z: <https://www.tretiruka.cz/news/jake-normy-museji-splnovat-chladirny-a-mrazirny/>
- [37] *Luvata výparník CTE 501-A8 ED* [online]. [cit. 19. 2. 2021]. Dostupné z: <http://www.beijerref.cz/e-shop/vymeniky-a-vyparniky/vyparniky/luvata/luvata-vyparnik-cte-501-a8-ed-5847cz>
- [38] *Odvhlčovač vzduchu R-9390 Heavy Duty* [online]. [cit. 18. 1. 2021] Dostupné z: <https://rohnsen.cz/produkt/r-9390/>
- [39] *Tvorba ledu v mrazicích buňkách* [online]. [cit. 19. 2. 2021] Dostupné z: <http://www.hbkrako.cz/tvorba-ledu-v-mrazicich-bunkach/>
- [40] *Two Units Installed in Three Months. Return on Investment in First Year* [online]. 15. 2. 2016 [cit. 18. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.air-solutions.co.nz/news/2016/2/15/icedry1400-installed-at-taylor-preston>
- [41] *Účinky vlhkosti na sbírkové materiály* [online]. [cit. 6. 1. 2021]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/17588199-Ucinky-vlhkosti-na-sbirkove-materialy.html>
- [42] *Why Does Ice Build up in Cold Stores and Freezers?* [online]. 14. 12. 2020 [cit. 14. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.air-solutions.co.nz/news/2014/11/26/why-does-ice-and-snow-build-up-in-cold-stores-and-freezers-wjeh4>
- [43] *A Guide to Conditioned Cold Stores* [online]. [15.5.2021]. Dostupné z: <https://www.munters.com/globalassets/inriver/resources/products/dehumidifiers/3976>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$a$	$[\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}]$	Specifický povrch
$A$	$[\text{m}^2]$	Povrch pórů
$a_m$	$[\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}]$	Specifický povrch podle hmotnosti
$A_O$	$[\text{m}^2]$	Vnější plocha výparníku
$a_v$	$[\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}]$	Vlastní specifický povrch
$c_a$	$[\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	Měrná tepelná kapacita suchého vzduchu
$\overline{c}_{pp}$	$[\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	Střední měrná tepelná kapacita při kons. tlaku vodní páry
$\overline{c}_{pv}$	$[\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	Střední měrná tepelná kapacita při kons. tlaku suchého vzduchu
$c_v$	$[\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	Měrná tepelná kapacita vodní páry
$h$	$[\text{kJ}/\text{kg}_{\text{s.v.}}]$	Entalpie vlhkého vzduchu
$h_p$	$[\text{kJ}/\text{kg}_{\text{s.v.}}]$	Entalpie přehřáté vodní páry
$h_v$	$[\text{kJ}/\text{kg}_{\text{s.v.}}]$	Entalpie suchého vzduchu
$k$	$[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$	Součinitel prostupu tepla
$l_{(23)tr}$	$[\text{kJ}/\text{kg}]$	Měrné výparné teplo vody při teplotě trojného bodu
$m$	$[\text{kg}]$	Hmotnost vlhkého vzduchu
$m_k$	$[\text{kg}]$	Hmotnost vody v kapalném skupenství
$m_p$	$[\text{kg}]$	Hmotnost přehřáté vodní páry
$m_t$	$[\text{kg}]$	Hmotnost vody v tuhém skupenství
$m_v$	$[\text{kg}]$	Hmotnost suchého vzduchu
$\dot{M}$	$[\text{kg}/\text{s}]$	Hmotnostní tok
$\dot{M}_k$	$[\text{kg}/\text{s}]$	Hmotnostní tok zkondenzované vody
$\dot{M}_w$	$[\text{kg}/\text{s}]$	Hmotnostní tok vlhkosti vyvíjené v místnosti
$p$	$[\text{Pa}]$	Tlak vlhkého vzduchu
$p_p$	$[\text{Pa}]$	Tlak přehřáté vodní páry
$p''_p$	$[\text{Pa}]$	Tlak syté vodní páry
$p_v$	$[\text{Pa}]$	Tlak suchého vzduchu
$Q_R$	$[\text{W}]$	Chladicí výkon na výparníku
$\dot{Q}$	$[\text{W}]$	Celkový tok tepla
$\dot{Q}_c$	$[\text{W}]$	Tok citelného tepla
$\dot{Q}_v$	$[\text{W}]$	Tok vázaného tepla
$\dot{Q}_s$	$[\text{W}]$	Tepelný tok přenášen přes stěnu výparníku
$r_p$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Měrná plynová konstanta vodní páry

$r_v$	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Měrná plynová konstanta vzduchu
$t$	[°C]	Teplota vzduchu
$T$	[K]	Termodynamická teplota
$t_a$	[°C]	Teplota okolního vzduchu
$t_{ad}$	[°C]	Teplota mezního adiabatického ochlazení
$T_C$	[K]	Kondenzační termodynamická teplota
$t_m$	[°C]	Teplota mokrého teploměru
$t_r$	[°C]	Teplota rosného bodu
$T_R$	[K]	Vypařovací termodynamická teplota
$t_R$	[°C]	Teplota vypařovací
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Objem vlhkého vzduchu
$V_C$	[m <sup>3</sup> ]	Objem celé vrstvy adsorbentu
$V_p$	[m <sup>3</sup> ]	Objem vodní páry
$V_S$	[m <sup>3</sup> ]	Objem pevné fáze adsorbentu
$V_v$	[m <sup>3</sup> ]	Objem suchého vzduchu
$\dot{V}_p$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Objemový tok vzduchu přiváděný do větraného prostoru
$W$	[W]	Příkon chladírenské sestavy
$x$	[kg/kg <sub>s.v.</sub> ]	Měrná vlhkost
$x_o$	[kg/kg <sub>s.v.</sub> ]	Měrná vlhkost odváděného vzduchu
$x_p$	[kg/kg <sub>s.v.</sub> ]	Měrná vlhkost přehřáté vodní páry
$x_p$	[kg/kg <sub>s.v.</sub> ]	Měrná vlhkost přiváděného vzduchu
$\Delta h$	[kJ/kg <sub>s.v.</sub> ]	Rozdíl entalpií
$\Delta t$	[°C, K]	Teplotní rozdíl
$\Delta x$	[kg/kg <sub>s.v.</sub> ]	Rozdíl měrných vlhkostí
$\delta$	[J/kg <sub>s.v.</sub> ]	Směr změny v h-x diagramu
$\varepsilon$	[–]	Porozita
$\varepsilon_c$	[–]	Poměr energetické náročnosti (EER)
$\varepsilon_{cc}$	[–]	Teoretický poměr energetické náročnosti (EER)
$\vartheta$	[–]	Faktor citelného tepla
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota vlhkého vzduchu
$\rho''_p$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota syté vodní páry
$\rho_s$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota pevné fáze adsorbentu

---

$\rho_v$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Hustota suchého vzduchu
$\rho_p$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Hustota přehřáté vodní páry
$\varphi$	$[\%, -]$	Relativní vlhkost
$\Phi$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Absolutní vlhkost

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1: Technický list vodního výměníku

## Příloha č.1



D.B.M. SpA a Socio Unico

Via Ugo La Malfa 10 – 28040 Varallo Pombia (NO) – Italy

Tel. +39 0321 956794 – E mail: [sales@dbmcoils.com](mailto:sales@dbmcoils.com)

## DESIGN DATA

## EXTERNAL FLUID: Air

Ambient pressure	mmHg	760
Capacity	kW	243.10
Gas quantity	kg/h	18000
Air treated weight	kg/h	18000
Inlet temperature	°C	35.00
Absolute humidity	g/kg	16.60
Outlet temperature	°C	10.00
Outlet absolute humidity	g/kg	7.58

Safety on surface

20%

Sensible heat factor		0.52
Condensed water	kg/h	162.40
Actual velocity	m/s	2.80
Pressure drop	Pa	356+30
Dry fin pressure drop	Pa	222

## INTERNAL FLUID: Water

Inlet temperature	°C	3.00	Pressure drop	kPa	67.70
Outlet temperature	°C	8.00	Density	kg/m <sup>3</sup>	999
Liquid weight	kg/h	41620	Viscosity	mPa.s	1.49
Liquid volume	l/h	41624	Conductivity	W/mK	0.57
Actual velocity	m/s	1.86	Specific heat	J/kgK	4204.30

## N°1 Coil Inox304-Al-Inox304 P40AR 11R-25T-1600A-3.0pa 34C 4"

## TECHNICAL FEATURES

Tubes	Inox304	16.45 x 0.60	mm	Weight	384 Kg
Fins	Al	0.25	mm	Internal volume	111 dm <sup>3</sup>
Frame	Inox304	2.50 / 2.50	mm	Total exchange surface	362.99 m <sup>2</sup>
Manifolds material	Inox304			PED 2014/68/UE Cat.	Article 4.3
				Maximum allowable pressure	10.0 bar
				Min/Max allowable temp.	-40/250 °C

## ACCESSORIES

Plastic eliminator.  
Threaded flanges PN16 Inox304

Threads type EN 10226-2

Certified calculation - Counterflow

